

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Ahmed Abdalla**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Ahmed Abdalla

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju, pomoći, strpljenju i stručnom vođenju kroz izradu završnog rada.

Zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na velikoj pomoći i strpljenju tijekom izrade završnog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije na omogućavanju izvođenja eksperimentalnog rada kao i na njihovoj pomoći.

Ahmed Abdalla



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ahmed Abdalla**

Mat. br.:0035198216

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**PRIMJENA AUSTENITNIH ELEKTRODA ZA MOKRO  
PODVODNO ZAVARIVANJE**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**APPLICATION OF AUSTENITIC ELECTRODES FOR  
UNDERWATER WET WELDING**

Opis zadatka:

Analizirati primjenu mokrog podvodnog zavarivanja u održavanju podvodnih objekata sa stanovišta primjenjivih postupaka zavarivanja i dodatnih materijala. Definirati glavne značajke dodatnih materijala koji se primjenjuju za REL zavarivanje i njihovu komercijalnu dostupnost te posebno obraditi obložene elektrode s austenitnom jezgrom. Navesti neke primjere sanacije podvodnih objekata sa detaljnim opisom tehnologije i odabirom dodatnih materijala.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je odabrati odgovarajući tip i promjer obložene elektrode s austenitnom jezgrom te definirati način pripreme za primjenu u mokrom podvodnom zavarivanju. Nakon pripreme elektrode, provesti probno zavarivanje u slatkoj vodi i odrediti operativne parametre zavarivanja. Na temelju odgovarajućih razornih i nerazornih ispitivanja odrediti mogućnosti upotrebe za realne podvodne sustave.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Zadatak zadao:

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Predsjednik Povjerenstva:

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
2. Mokro podvodno zavarivanje .....	2
2.1. Povijesni razvoj i značaj.....	2
2.2. Postupak podvodnog zavarivanja.....	3
2.2.1. Plinski omotač .....	4
2.2.2. Električni luk .....	6
2.2.3. Usporedba REL mokrog podvodnog zavarivanja i „suhog“ REL zavarivanja.....	6
2.2.4. Unos topline i mikrostrukturne transformacije zavara i ZUT-a.....	7
2.3. Oprema za mokro podvodno zavarivanje.....	8
2.3.1. Izvor struje.....	9
2.3.2. Držać elektrode .....	10
2.3.3. Kabeli za podvodno zavarivanje .....	11
2.3.4. Oprema za ronjenje .....	11
2.3.4. Elektrode za REL podvodno zavarivanje.....	12
2.3.4.1. Austenitne elektrode.....	15
2.3. Specifičnosti mokrog podvodnog zavarivanja .....	16
2.3.1. Poroznost i krhkost .....	16
2.3.1.1. Hladne pukotine .....	17
2.3.2. Problem zakaljivanja.....	18
2.3.3. Smanjenje vidljivosti kod zavarivanja .....	19
3. PRIMJER SANACIJE PODVODNOG OBJEKTA- PODVODNI POPRAVAK TERETNJAKA.....	20
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	29
4.1. Materijal uzorka .....	30
4.2. Uređaj za zavarivanje .....	31
4.3. Parametri zavarivanja.....	32
4.4. Elektrode za mokro podvodno zavarivanje .....	33
4.5. Rezultati i njihova analiza .....	36
4.5.1. Nerazorna ispitivanja – Penetranti .....	39
4.5.2. Razorna metoda ispitivanja – metalografsko ispitivanje.....	43
5. ZAKLJUČAK .....	50
LITERATURA.....	52
PRILOZI.....	54



**POPIS SLIKA**

Slika 1. Naftno polje i naftna platforma	1
Slika 2. Prvi testovi nove tehnologije	2
Slika 3. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja	4
Slika 4. Shematski prikaz električnog luka pri mokrom podvodnom zavarivanju	5
Slika 5. Rast i odvajanje mjehurića prilikom mokrog podvodnog zavarivanja	5
Slika 6. Mikrostruktura u polju zone utjecaja topline	7
Slika 7. Brzina hlađenja zavara i ZUT-a pri podvodnom zavarivanju	8
Slika 8. Brzina hlađenja zavara i ZUT-a pri atmosferskom zavarivanju	8
Slika 9. Oprema za mokro podvodno zavarivanje	9
Slika 10. Izvor električne energije za podvodno zavarivanje	10
Slika 11. Držač elektrode za podvodno zavarivanje	10
Slika 12. Presjek kabla za zavarivanje	11
Slika 13. Zavarivač u opremi za podvodno zavarivanje	12
Slika 14. Shema elektrode	13
Slika 15. Elektrode Navy 1 i Navy 2	14
Slika 16. Sistematizacija elektroda s obzirom na vrstu obloge	15
Slika 17. Prikaz plošno centrirane kubične strukture	15
Slika 18. Zavarivanje tehnikom njihanja elektrode	19
Slika 19. Zavarivanje tehnikom povlačenja	20
Slika 20. Panamski kanal	21
Slika 21. Teretnjak oštećen u nesreći	21
Slika 22. Pukotina na pramcu broda	22
Slika 23. Ronilačka ekipa iz tvrtke Miami Diver Inc	22
Slika 24. Pukotina na pramcu broda	23
Slika 25. Hydroweld elektrode	24
Slika 26. Zavari napravljeni elektrodom HYDROWELD FS	25
Slika 27. Stanje nakon izvršenih popravaka	27
Slika 28. Izgled popravka	27
Slika 29. Izgled popravka na većim rupama	28
Slika 30. Pogled na popravke u brodogradilištu	28
Slika 31. Popravci na pramcu broda	28
Slika 32. Bazen za zavarivanje	29
Slika 33. Uzorak na postolju u bazenu	29

Slika 34. Uređaj za zavarivanje ULJANIK IRA 400	31
Slika 35. Karakteristike aparata za zavarivanje	31
Slika 36. Elektroda R 19/9 prije bojanja	33
Slika 37. Elektroda R 29/9 prije bojanja	34
Slika 38. Elektroda EZ-KROM 30 R (kontrolna elektroda)	34
Slika 39. Duralux pu - lak za drvo i metal	35
Slika 40. Combicolor rust oleum - lak za metal	35
Slika 41. Elektrode nakon bojanja	36
Slika 42. Zavarivanje pod vodom	36
Slika 43. Zavar izveden s elektrodom R29/9	37
Slika 44. Zavar izveden elektrodom R19/9	37
Slika 45. Kontrolni zavar	35
Slika 46. Vanjski sloj elektrode R 29/9 nakon zavarivanja (ljuštenje i izgoreni dijelovi)	38
Slika 47. Vanjski sloj elektrode R 19/9 nakon zavarivanja (ljuštenje i izgoreni dijelovi)	38
Slika 48. Kontrolna elektroda nakon zavarivanja	39
Slika 49. Postupak primjene penetranstke metode ispitivanja	39
Slika 50. Penetrant (lijevo) i razvijatelj (desno) korišteni u eksperimentu	40
Slika 51. Penetrant na zavaru 1	41
Slika 52. Penetrant na zavaru 2	41
Slika 53. Penetrant na kontrolnom zavaru	41
Slika 54. Rezultati penetracijske analize na zavaru 1	41
Slika 55. Rezultati penetracijske analize na zavaru 2	42
Slika 56. Pukotina na kontrolnom zavaru	42
Slika 57. Tračna pila	43
Slika 58. Uzorak prije brušenja	44
Slika 59. Geometrija zavara na presjeku	45
Slika 60. Makro izbrusak zavara 1 – Promjer ZUT-a i dimenzije	46
Slika 61. Makro izbrusak prikazuje greške u zavaru 1	46
Slika 62. Geometrija zavara 2	47
Slika 63. ZUT i geometrija zavara 2	48
Slika 64. Geometrija zavara 3	48
Slika 65. ZUT i duljina pukotine	49



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Testne vrijednosti zavara <i>HYDROWELD</i> elektrodom	25
Tablica 2. Svojstva čelika A 36	26
Tablica 3. Udio legirnih elemenata u čeliku S355	30
Tablica 4. Parametri zavarivanja korišteni u eksperimentu	32
Tablica 5. Sastav eksperimentalnih elektroda	33
Tablica 6. Sastav elektrode sa tvornički nanešenim vodonepropusnim lakom	33

## **POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
ZUT	Zona utjecaja topline
AWS	American welding society
MMA	Manual metal arc welding

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
AC	A	Izmjenična struja
DC	A	Istosmjerna struja
q	kJ/cm	Unos topline
CO	- -	Ugljični monoksid
CO <sub>2</sub>	-	Ugljični dioksid
O <sub>2</sub>	-	Kisik
N <sub>2</sub>	-	Dušik
C	-	Ugljik
Cr	-	Krom
Mn	-	Mangan
Ni	-	Nikal
Si	-	Silicij
Mo	-	Molibden

## **SAŽETAK**

Glavna tema ovog rada je „Primjena austenitnih elektroda za mokro podvodno zavarivanje“.

Sastoji se od dva dijela: teorijskog i eksperimentalnog.

Teorijski dio prikazuje tehnike mokrog podvodnog zavarivanja u praksi s naglaskom na REL mokro podvodno zavarivanje. Analizirani i opisani su principi rada, tehnike zavarivanja, svojstva i problematika mokrog podvodnog zavarivanja, materijali za zavarivanje.

Eksperimentalni dio sadrži plan pokusa koji ima za cilj prikazati prednosti primjene austenitnih elektroda u mokrom podvodnom zavarivanju. Opisana je oprema korištena u pokusu, dodatni materijal i metode kontrole kvalitete zavara

Ključne riječi: austenitne elektrode, mokro podvodno zavarivanje



## SUMMARY

The main topic of this thesis is „The application of austenitic electrodes in wet underwater welding“. It consists of two parts, theoretical and experimental.

In the theoretical part MMA underwater wet welding is described in detail. Special care is put into explaining welding principles and problems of underwater wet welding. Dangers and working techniques are also analyzed.

Experimental part contains description of materials, parameters, equipment and welding techniques. The experimental parts goal is to highlight the advantages of using austenitic electrodes in underwater wet welding.

Key words: MMA underwater wet welding, austenitic electrodes

## 1. UVOD

Homo sapiens, biće sa žeđi za tehnologijom i njezinim povlasticama, u potrazi za novim izvorima „financiranja“ tehnološkog napretka prodire dublje u zemljinu koru. Većina velikih zaliha neobnovljivih izvora (nafta i zemni plin) nalaze se na dnu, te razvoj tehnologija i infrastrukture specifičnih za to polje se ubrzava. Ubrzanje je izazvano smanjenjem dostupnih resursa na kontinentima.



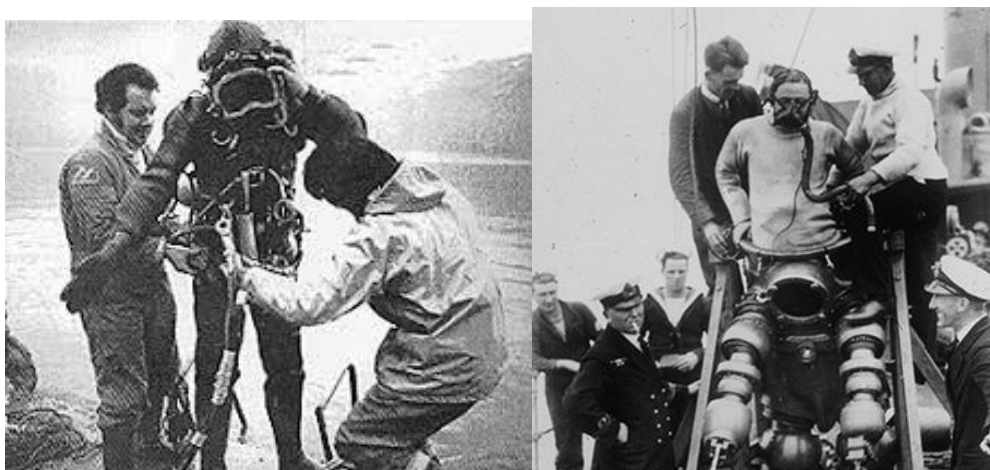
Slika 1. Naftno polje i naftna platforma [23]

U današnjem vremenu transport morskim putem i eksploatacija podmorja imaju sve veći utjecaj na gospodarstvo jedne regije, stoga zahtijevaju velika infrastrukturna ulaganja. Povećanjem broja pomorskih i podmorskih konstrukcija, dolazi do povećanja zahtjeva za razvojem popratnih tehnologija za održavanje istih. U tu skupinu tehnologija spada i podvodno zavarivanje sa svim svojim varijantama (suho podvodno zavarivanje i mokro podvodno zavarivanje). Iako je zavarivanje u današnjem svijetu tehnologija s mnogo različitih varijanti i specifičnih procesa razvijenih za posebne primjene. Većina zavarivačkih disciplina primjenjiva je samo u atmosferskim uvjetima što podvodno zavarivanje čini teškim i zahtjevnim procesom.

## 2. Mokro podvodno zavarivanje

### 2.1. Povijesni razvoj i znača

Podvodno zavarivanje je usko vezano s rezanjem te se počinje spominjati krajem 19. i početkom 20. stoljeća. U tom periodu bilo je nepojmljivo da se pod vodom ostvaruje električni luk, jer bi to značilo smrt za ronioca. Tehnologija podvodnog zavarivanja počinje svoj razvoj u Sovjetskom savezu na početku 20. stoljeća u St. Peterburgu na Narodnom Elektrotehničkom fakultetu. U tom periodu, fakultet pohađa mladi Konstantin Khrenov, čovjek koji se smatra ocem podvodnog zavarivanja i rezanja. Khrenov pohađa fakultet do 1925. godine, nakon koje napušta fakultet i traži način za primjenu svojih znanja.



Slika 2. Prvi testovi nove tehnologije [1]

Rat i konflikt su od pamtivijeka katalizatori za razvoj novih tehnologija, što je upravo slučaj s podvodnim zavarivanjem. Naime, posljedice prvog svjetskog rata su još bile vidljive na pomorskoj floti Sovjetskog saveza. U tom periodu osjetio se ponovni rast napetosti između europskih sila, te je postojala mogućnost ponovnog konflikta. Mladi Khrenov osjetio je potrebu za razvojem tehnologije koja bi omogućila brze popravke pukotina i rupa na brodovima te bi stvorila prednost sovjetskoj floti.

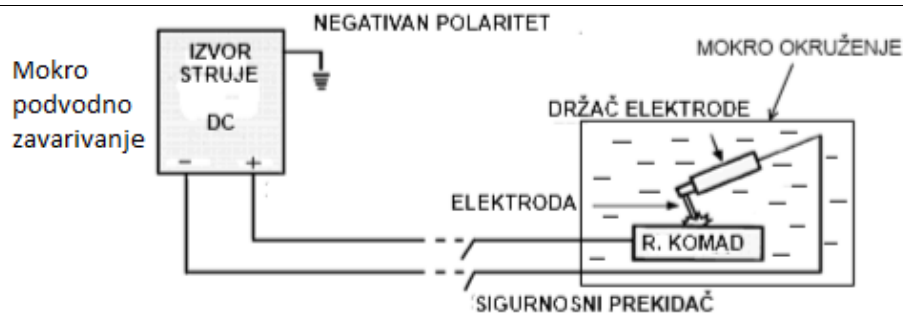


Najveći problem podvodnog zavarivanja u tom periodu je bila nestabilnost izvora električne struje i sporadično stvaranja mjehurića plina. Zavari su bili porozni i neupotrebljivi. Khrenov je elektrode presvukao vodonepropusnim slojem i razvio stabilniji izvor električne energije. Bez tih prepreka sve je bilo spremno za prvo testiranje nove tehnologije. Testiranje je bilo uspješno i provedeno je 1932. godine na Crnom moru, što je značilo da je tehnologija bila spremna za Drugi svjetski rat.

Područje primjene tehnologije se proširilo s popravaka pukotina na trupu broda na popravke i rezanja velikih metalnih zidova korištenih u *off-shore* konstrukcijama (platforme, cjevovodi i spremnici). Dubina primjene tehnologije i danas je ograničena na dubine do 50 metara, taj parametar ovisi o sigurnosnim protokolima ronjenja (sigurnosno ograničena dubina ronjenja uz pomoć boce na komprimirani zrak je 50 metara). Osim ograničenja ronjenja, dubina do 70 metara je maksimalna dubina na kojoj se može provoditi sigurno REL zavarivanje. Pod „sigurno REL zavarivanje“ podrazumijevamo zavarivanje u kojem je mjehur para i plina stvoren oko vrha elektrode dostatan za održavanje električnog luka i ostvarivanje prihvatljivih zavara. Provedena su istraživanja na većim dubinama (180 metara) ali najbolja svojstva su ostvarena na manjim dubinama. Dodatni zahtjev dubina većih od 50 metara je da su ronionicima potrebne posebne smjese ukapljenog plina za rojenje. [1]

## 2.2. Postupak podvodnog zavarivanja

Mokro podvodno zavarivanje je dobilo naziv zbog činjenice da su i zavarivač i električni luk okruženi vodenim medijem. Proces se primarno izvodi REL postupkom zavarivanja i prvenstveno se upotrebljava kao reparaturna tehnika na morskim konstrukcijama. Zbog teškog okruženja i problematike električnog luka u stranom mediju rezultati dobiveni ovom tehnologijom slabije su kvalitete nego zavari napravljeni u zračnoj atmosferi te se tehnologija koristi samo u situacijama kada nije moguće izvaditi konstrukciju iz vodenog medija (hitno reparaturno zavarivanje i održavanje). Povećanjem broja pomorskih konstrukcija i eksploatacije mora dolazi do povećanja značaja ove tehnologije.



Slika 3. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja [3]

Zbog svoje praktičnosti i fleksibilnosti, veliki su resursi uloženi u razvoj ove tehnologije ali i dalje postoje velika ograničenja REL postupka zavarivanja kao što su ograničenja dubine i nemogućnost potpune automatizacije postupka

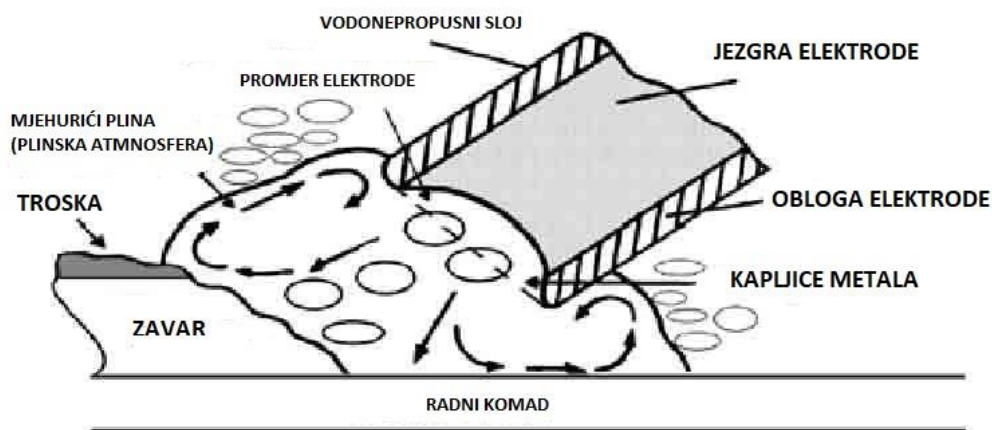
Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom zavarivanja karakterizira sljedeće [2]:

- nestabilnost električnog luka što uzrokuje nepravilnu geometriju zavarenog spoja, uključke troske, porozitet i nedovoljnu penetraciju.
- brzo hlađenje dovodi do visoke tvrdoće u zoni utjecaja topline, niske vrijednosti udarnog rada loma zavarenog spoja i pojave poroziteta zbog zarobljavanja plinskih mjehurića.
- visok sadržaj vodika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavara što dovodi do zarobljavanja vodika u metalu zavara i zoni utjecaja topline. To povećava osjetljivost na pojavu hladnih pukotina, uzrokuje porozitet i degradira mehanička svojstva spoja.
- visok sadržaj kisika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavara što dovodi do oksidacije, snižavanja udjela legiranih elemenata i degradacije mehaničkih svojstava.
- raspad i otapanje obloge elektrode što rezultira nestabilnošću električnog luka i pojavom poroziteta.

### 2.2.1. Plinski omotač

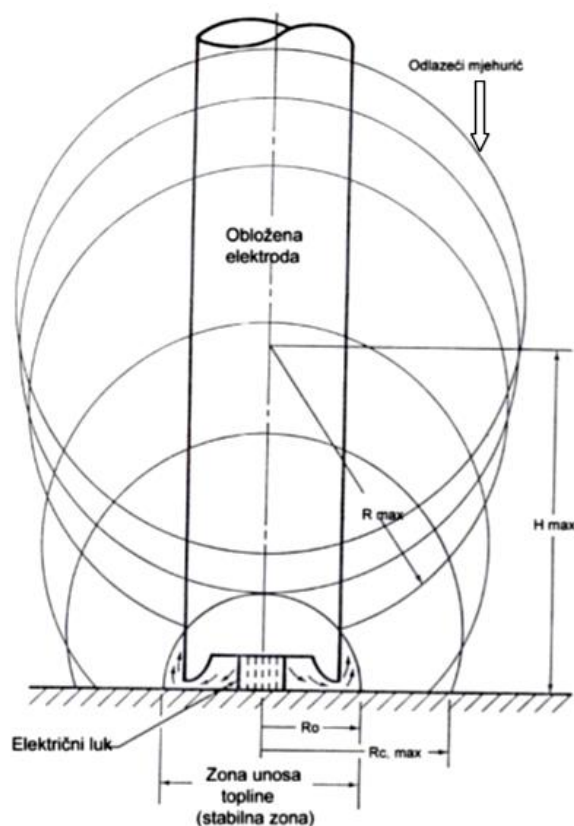
Mokro podvodno REL zavarivanje omogućava plinski omotač, koji se nalazi na vrhu elektrode. Naime, energija koju oslobađa električni luk dovoljna je da se voda oko vrha elektrode pretvori u paru. Osim vodene pare u smjesi plinova najčešće se nalazi vodik, koji nastaje disocijacijom vode uzrokovanoj električnim pražnjenjem.

Električni luk, vrh elektrode i površina ispod vrha elektrode nisu u kontaktu s vodom. Sve dok je plinski mjehur stabilan i dostatan da pokrije mjesto zavarivanja, zavarivanje će biti moguće.



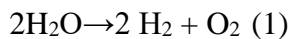
Slika 4. Shematski prikaz električnog luka pri mokrom podvodnom zavarivanju [3]

Rast plinskog mjehurića uzrokovan je disocijacijom vode i raspadom obloge elektrode, te on raste sve dok njegov polumjer ne bude tangenta na inicijalnu prazninu.



Slika 5. Rast i odvajanje mjehurića prilikom mokrog podvodnog zavarivanja [2]

Disocijacija vode se odvija prema jednadžbi [2]:



Izgaranjem obloge u prisustvu kisika nastaje ugljikov dioksid koji disocira prema formuli:



Ukupni volumni sastav plinske atmosfere je [2]:

- 62-82 %  $\text{H}_2$
- 11-24 %  $\text{CO}$
- 4-6 %  $\text{CO}_2$
- $\text{O}_2$
- $\text{N}_2$

### 2.2.2. Električni luk

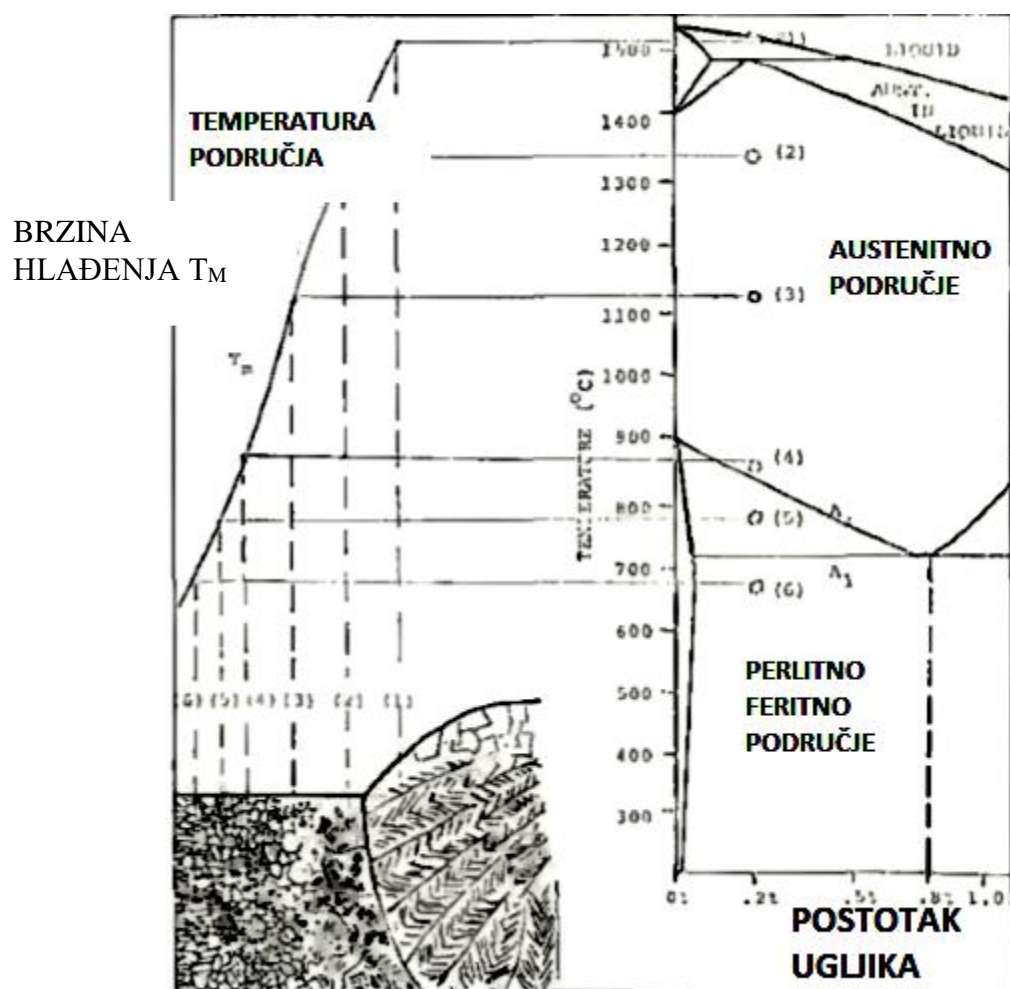
Električni luk ima svojstvo „samoregulacije energetske stanja“, što znači da prilikom unosa šuma u sustav dolazi do samoregulacije cijelog sustava. Točnije, ako na jednom dijelu dolazi do bržeg hlađenja sustav će na to reagirati s povećanjem dovoda energije na tom području, a hlađenje će biti kompenzirano s povećanjem generiranja topline. Električni luk koji je zaštićen i uspostavljen je teško izbaciti iz ravnoteže. Zbog ovog svojstva taljenje materijala je jednako intenzivno na zraku i u vodi, što znači okruženje u ovom smislu ne igra ulogu.

### 2.2.3. Usporedba REL mokrog podvodnog zavarivanja i „suhog“ REL zavarivanja

Vrsta medija oko zavara utječe na brzinu odvođenja topline oko zavara. Usporedbom REL zavarivanja na suhom i pod vodom vidljive su velike razlike. Usporedbom parametara potrebnih za zavarivanje (napon i jakost struje) zaključeno je da je za mokro podvodno zavarivanje potreban veći napon za ostvarivanje iste jakosti struje električnog luka. Osim parametara zavarivanja vidljiva je razlika u geometriji zavara pri istim parametrima zavarivanja. Zavari izrađeni u vodi imaju nižu nadvišenje od one dobivene na zraku i zavari su uži. Primjetna je razlika u veličini ZUT-a (zona utjecaja topline) koji je 30 -50% manji na zavarima izrađenim pod vodom. Taj rezultat je bio očekivan jer zbog medija brzina odvođenja topline je puno veća. [4]

## 2.2.4. Unos topline i mikrostrukturne transformacije zavara i ZUT-a

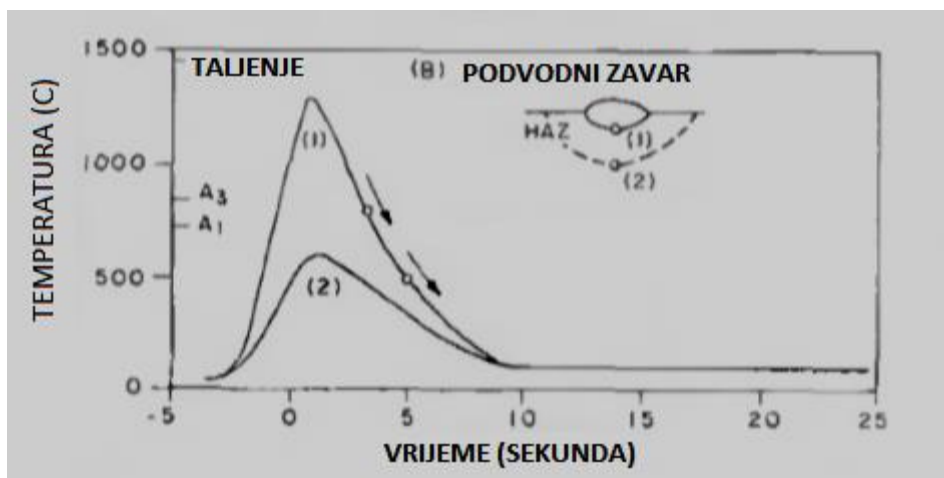
Mikrostrukturne transformacije i parametri solidifikacije zavara određeni su unosom topline. Rekristalizacija i rast zrna određeni su maksimalnom temperaturom područja unutar ZUT-a. Na slici 6. prikazan je odnos između temperature područja i očekivane mikrostrukture materijala.



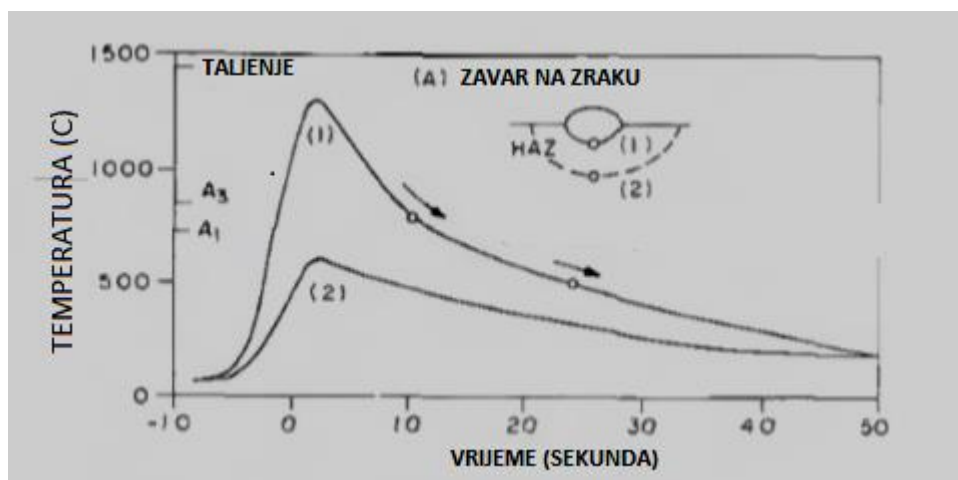
Slika 6. Mikrostruktura u polju zone utjecaja topline [4]

Brzina hlađenja određuje vrstu transformacijskog procesa. Pri sporom hlađenju, krajnje postignuta mikrostruktura je ravnotežna perlitna kristalna struktura s feritnom matricom, dok pri većim brzinama hlađenja postiže se neravnotežna mikrostruktura bainita i martenzita.

U slučaju podvodnog zavarivanja okolina utječe na veliku brzinu hlađenja, što ima za posljedicu neravnotežnu mikrostrukturu u ZUT-u. Slike 7 i 8 pokazuju odnos brzina hlađenja pri podvodnom i atmosferskom zavarivanju. [4]



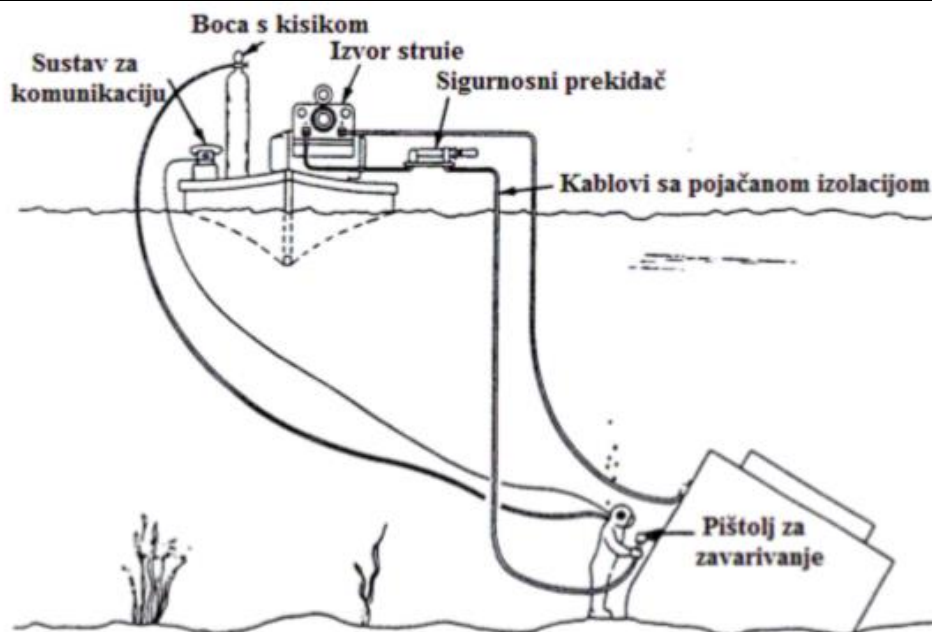
Slika 7. Brzina hlađenja zavara i ZUT-a pri podvodnom zavarivanju [4]



Slika 8. Brzina hlađenja zavara i ZUT-a pri atmosferskom zavarivanju [4]

### 2.3. Oprema za mokro podvodno zavarivanje

Oprema za mokro podvodno zavarivanje sastoji se od sličnih dijelova kao oprema za suho zavarivanje. Oprema je prilagođena većem riziku samog postupka zavarivanja. Sastoji se od izvora, kabela s povećanom izolacijom, držača elektrode i elektroda za mokro podvodno zavarivanje.



Slika 9. Oprema za mokro podvodno zavarivanje [24]

Kao što je vidljivo na slici 9. u opremu još spada sigurnosni prekidač, komunikacijski sustav i oprema za ronjenje. Za razliku od zavarivanja na zraku, za mokro podvodno zavarivanje potreban je pomoćni tim ljudi koji su na površini. Pomoćni tim je u konstantnoj komunikaciji sa zavarivačem te se brinu o parametrima zavarivanja (na zahtjev ronioca), dobavi zraka, opskrbom ronioca alatom i elektrodama. [5]

### 2.3.1. Izvor struje

Izvor struje za podvodno zavarivanje mora biti u mogućnosti proizvesti velike jakosti struje jer u vodenom okolišu za isti napon potrebno je proizvesti veću jakost struje u usporedbi s istim parametrima zavarivanja na zraku. Električna energija potrebna za elektrolučno zavarivanje je nestabilna jer su napon i jakost struje promjenjivi te ovise o više faktora koji su isto promjenjivi. Kad se uspostavi kontakt električnim lukom dolazi do stvaranja kratkog spoja to ima za posljedicu smanjenje otpora u strujnom krugu i povećanje napona. Izvori su konstruirani da ograničavaju porast i tom mjerom smanje rasprskivanje prilikom zavarivanja. Struja može biti istosmjerna (DC) ili izmjenična (AC). Za podvodno zavarivanje se ne koristi izmjenična struja zbog sigurnosnih razloga i poteškoća pri održavanju električnog luka. [7]



Slika 10. Izvor električne energije za podvodno zavarivanje [25]

Za električni izvor najvažnije svojstvo je stabilnost jakosti električne struje, što omogućava jednoliku brzinu taljenja elektrode. [7]

### 2.3.2. Držać elektrode

Uvjeti koji vladaju pri podvodnom zavarivanju nisu idealni za konvencionalne držače elektroda, stoga imamo posebne držače elektroda za podvodno zavarivanje. Specifičnost procesa zavarivanja nalaže da držač mora biti lagan i ergonomičan. Slana voda je dobar vodič električne energije, stoga su držači izrađeni od polimera radi sigurnosnih razloga. Držači imaju za cilj olakšati posao zavarivaču uz zadržavanje preciznosti i stabilnosti elektrode. [6]



Slika 11. Držać elektrode za podvodno zavarivanje [26]



### 2.3.3. Kabeli za podvodno zavarivanje

Zavarivanje koje se odrađuje na dubinama do 50 metara zahtijevaju kabele većih duljina i većih promjera. Povećanjem promjera osigurano je da pri oštećenju kabela neće doći do kontakta vode s bakrenom jezgrom i da imamo manje otpore unutar kabela te manji pad napona. Minimalna površina poprečnog presjeka kabela je  $50 \text{ mm}^2$ .

Zbog veće duljine kabela dolazi do pada napona između izvora i držača stoga kabel mora uvijek biti što je moguće kraći. Spojevi na izvoru i držaču moraju biti što čišći i moraju biti izolirani višestrukim slojevima izolacije (guma). [6]



Slika 12. Presjek kabla za zavarivanje [27]

### 2.3.4. Oprema za ronjenje

Za uspješno i sigurno podvodno ronjenje potrebno je [6]:

- ronilačka kaciga- kaciga koja ima implementirano zaštitno staklo za zavarivanje, te omogućava neprekidan dotok kisika i komunikaciju sa ljudima na površini
- odijelo za ronjenje- ima funkciju zaštite ronioca i održavanja tjelesne temperature na velikim dubinama
- gumene rukavice- služe za zaštitu i za izolaciju zavarivača
- boca stlačenog zraka
- crijevo za dobavu zraka.

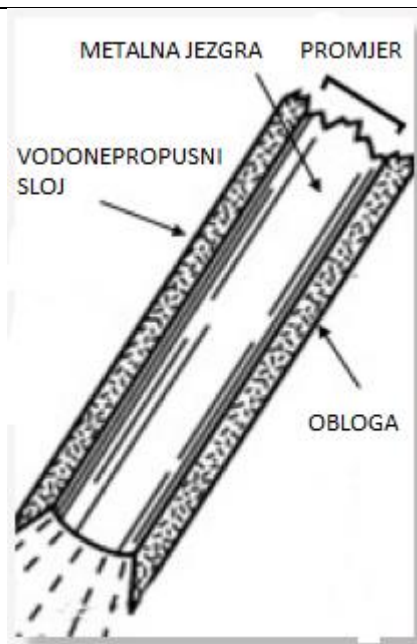


Slika 13. Zavarivač u opremi za podvodno zavarivanje [28]

#### 2.3.4. Elektrode za REL podvodno zavarivanje

Elektrode koje se koriste za REL mokro podvodno zavarivanje sastoje se od metalne jezgre, obloge i vodonepropusnog sloja. Postoje različite varijante i kombinacije jezgre, obloge i vodonepropusnog sloja, s kojima želimo postići različita svojstva elektroda i zavarenog spoja. Jezgra elektrode izrađena je od žice ili šipke i može imati sličan sastav osnovnom materijalu kojeg zavarujemo te s tim postizemo homogenu strukturu po presjeku površine. U nekim slučajevima poželjno je koristiti elektrode s drugačijim sastavom kao na primjer elektrode od austenitnog nehrđajućeg čelika kojima se zavaruje ugljični čelik.

Obloga elektrode se sastoje od više različitih sastojaka, od kojih su neki rutil, celuloza, željezni oksid, kalcijev fluorid. Obloga se na metalnu jezgru nanosi umakanjem ili prešanjem. Obloga i premazi nanešeni na nju u potpunosti sprečavaju prodiranje vode u oblogu te igraju bitnu ulogu u stabilizaciji električnog luka u vodenom mediju. Električni luk se održava u parno-plinskoj atmosferi koja nastaje isparavanjem i disocijacijom vode oko vrha elektrode. [9]



Slika 14. Shema elektrode [8]

Obloga ima tri ključne uloge:

- električnu
- fizičku
- metaluršku.

Električna funkcija podrazumijeva uspostavljanje i stabilno održavanje električnog luka. Obloga sadrži plinove koji se pri taljenju elektrode oslobađaju te atmosferu čine ioniziranom, što olakšava uspostavu i održavanje električnog luka.

Fizička uloga podrazumijeva olakšano zavarivanje u prisilnim položajima (nadglavno zavarivanje). U prisilnim položajima potrebna je viskozna talina, talina koja se može oduprijeti gravitaciji. Osim zavarivanja u prisilnim položajima fizička uloga elektrode je i zaštita taline od štetnih plinova.

Metalurška uloga se odnosi na zavareni spoj u toku zavarivanja. Značajke su joj:

- legiranje
- otplinjavanje
- rafinacija.

Legiranjem nadoknađujemo legirne elemente koji izgaraju tijekom procesa zavarivanja. Osim nadoknade možemo i naknadno legirati područje zavara.

Proces otplinjavanja ima ulogu otklanjanja nepoželjnih plinova kao što su vodik i kisik. [9]

Rafinacijom uklanjamo sumpor i fosfor iz taline pomoću spojeva koji vežu te elemente i izbacuju ih u obliku troske.

Podjela elektroda za mokro podvodno zavarivanje s obzirom na vrstu metala jezgre glasi:

- feritne
- austenitne
- na bazi nikla.

Najčešće se koriste feritne elektrode, dok se austenitne i elektrode na bazi nikla koriste za zavarivanje čelika s povišenim ekvivalentom vodika. Dupleks i nehrđajući čelici se zavaruju specijalnim elektrodama. [9]

Podjela elektroda prema vrsti obloge [9]:

- rutilne
- bazične
- oksidirajuće
- celulozne
- elektrode sa željeznim prahom
- elektrode s mješovitom oblogom.



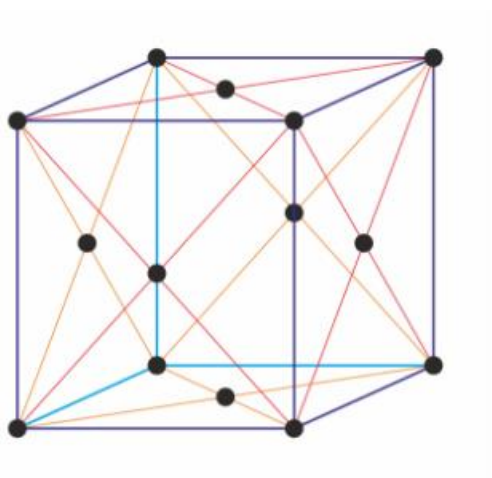
Slika 15. Elektrode Navy 1 i Navy 2 [14]

naziv ELEKTRODA po AWS.D3.6	TIP OBLOGE	POLOŽAJ ZAVARIVANJA	VRSTA STRUJE I POL	MATERIJAL POGODAN ZA ZAVARIVANJE
E6010 [9]	celulozna s Na vodenim staklom	svi	istosmjerna + pol	ASTM A36
E6013 [2]	rutilna s K vodenim staklom	svi	istosmjerna - pol	Č1330 DH36
E6027 [6]	na bazi željeznog oksida sa željeznim prahom	kutni i položen	istosmjerna - pol	Č1330
E7014 [2]	rutilna sa željeznim prahom	svi	istosmjerna + i - pol	DH 36
E7018 [6,9]	bazična s K vodenim staklom	svi	istosmjerna + pol	ASTM A36
E7024 [6]	rutilna sa željeznim prahom	kutni i položen	istosmjerna - pol	Č1330
E8018 [6]	bazična	svi	istosmjerna + pol	Č3130
E309-16 [2]	rutilna	svi osim vertikalni odozgo prema dolje	istosmjerna + pol	DH36
E310-16 [2]	rutilna	svi osim vertikalni odozgo prema dolje	istosmjerna + pol	DH36
E316L [3,14]	rutilno-bazična	svi osim vertikalni odozgo prema dolje	istosmjerna + pol	SA240 tip 304 i 304L SA312-316L

Slika 16. Sistematizacija elektroda s obzirom na vrstu obloge [9]

#### 2.3.4.1. Austenitne elektrode

Austenit je naziv za čvrstu intersticijsku otopinu ugljika u gama željezu ( $\gamma$ -Fe). Mikrostruktura austenita je plošno centrirana kubična struktura. [12]



Slika 17. Prikaz plošno centrirane kubične strukture [13]

Elektrode s austenitnom jezgrom imaju sposobnost otapanja velikih količina vodika i izvlače vodik iz područja zavora. Zbog tog svojstva smanjuju učestalost pojave pukotina uzrokovanih povećanim udjelom vodika u zavoru. Svojstvo koje najviše dolazi do izražaja pri mokrom podvodnom zavarivanju, gdje prisustvo vodika uvelike ugrožava kvalitetu zavora. [11]

Institut za zavarivanje (engl. Welding Institute) provodio je studiju o utjecaju uporabe austenitnih elektroda na učestalost pojave pukotina uzrokovanih povećanim udjelom vodika pri mokrom podvodnom zavarivanju. Zaključeno je da uporaba austenitnih elektroda smanjuje osjetljivost zavora na pukotine uzrokovane vodikom. Također je otkriveno da neke elektrode pri zavarivanju na zraku rezultiraju austenitnom mikrostrukturom dok pri zavarivanju pod vodom dobivaju se martenzitne mikrostrukture. Razlog tom je mikrostruktura osnovnog materijala i velike brzine hlađenja zavora. Austenitne elektrode su komercijalno dostupne u više izvedbi. Najčešće izvedbe su [11]:

- R142
- E316L
- E309-16 i E310-16.

### **2.3. Specifičnosti mokrog podvodnog zavarivanja**

Pri mokrom podvodnom zavarivanju treba obratiti pažnju na skup specifičnosti:

- poroznost i krhkost uzrokovana povećanim udjelom vodika
- problem zakaljivanja
- smanjenje vidljivosti kod zavarivanja.

#### **2.3.1. Poroznost i krhkost**

Poroznost i krhkost su uzrokovani plinovima koji se stvaraju prilikom zavarivanja. Električni luk uzrokuje disocijaciju okolne vode na vodik i kisik. U uvjetima zavarivanja na zraku kemijski sastav elektrode omogućava vezanje kisika i vodika te u krajnjem slučaju otklanjanje istih iz zavora. Talina, kod zavarivanja na zraku, se sporije hladi te vodik i nečistoće imaju vremena prirodno izaći iz metala zavora. Međutim, kod brzog hlađenja pri podvodnom zavarivanju, plinovi i nečistoće ostaju zarobljeni u metalu zavora i tim uzrokuju poroznost i krhkost. Razlika u temperaturi između medija (zrak i voda) ima za posljedicu da se temperature lukova razlikuju, naime za podvodno zavarivanje jedan dio energije i samim tim topline, odvodi se od luka te luk ima nižu temperaturu. Manja toplota luka onemogućuje talini

zavara da ostane dulje vruća i tim omogući da se plinovi i nečistoće na prirodan način oslobode. [9]

Radiografskim ispitivanjima uzoraka napravljenih na malim dubinama otkriveno je da nema značajne razlike između broja diskontinuiteta pri zavarivanju na zraku i na malim dubinama. Iz ispitivanja je zaključeno da su poroznost i dubina u proporcionalnom odnosu, točnije da s porastom dubine raste tlak, a i time poroznost. Pri povećanim tlakovima otežana je difuzija plinova iz taline zavara.

Kod mokrog podvodnog zavarivanja obloženom elektrodom na kvalitetu zavarenog spoja izravno utječu četiri faktora [9]:

- vodonepropusna obloga elektrode
- stabilnost električnog luka
- brzina hlađenja zavara
- dubina na kojoj se zavaruje.

#### **2.3.1.1. Hladne pukotine**

Pukotine koje nastaju nakon zavarivanja na temperaturama nižim od 300 °C. Mogu se pojaviti i više sati nakon zavarivanja, stoga se u praksi nakon zavarivanja čeka 24-48 sati prije provedbe nerazornih ispitivanja. Uobičajeno se pojavljuju pri zavarivanju uzoraka većih debljina i zavarivanja čelika povišene čvrstoće. Pukotine se mogu pojaviti u metalu zavara ili na prijelazu između metala zavara i osnovnog metala, te mogu biti orijentirane uzdužno ili poprečno u odnosu na zavar. Najopasnija značajka ovog tipa oštećenja je što pukotine nisu uvijek vidljive, točnije mogu biti na površini ili u metalu zavara. Veličinom pukotine mogu biti mikropukotine- oku ne vidljive i makropukotine- pukotine vidljive golim okom. [10]

Glavni uzroci nastanka hladnih pukotina su:

- prisutnost vodika u zavaru
- mikrostrukture zavara i ZUT-a osjetljive na djelovanja vodika
- zaostala naprezanja u području zavara i ZUT-a
- uključci u zavaru.

Mehanizam nastanka hladnih pukotina je složen i postoji nekoliko teorija nastanka. Najučestalija teorija je teorija porasta tlaka vodika u plinovitom stanju. Atomarni vodik ulazi u šupljine unutar kristalne rešetke te se tamo veže u molekularni vodik. Molekularni vodik

uzrokuje porast tlaka u kristalnoj rešetci, što je dovoljno za nastanak lokalnih pukotina i širenje već postojećih nehomogenosti strukture.

Zakaljen metal zavora ima smanjenju istezljivost pa pod utjecajem velikih zaostalih naprežanja lako puca. Hladne pukotine su česte kod reparaturnih zavarivanja slabo zavarljivih čelika i zavora s velikim zaostalim naprežanjima. Kod podvodnog mokrog zavarivanja velike su količine zaostalih naprežanja i vodika u metalu zavora što ima za posljedicu izrazitu osjetljivost na hladne pukotine.

Ispitivanje metala na hladne pukotine provodi se prema normi HRN EN ISO 17642-1:2008.

Uzroke hladnih pukotina nije moguće u potpunosti izbjeći ali se mogu smanjiti ili djelomično ukloniti. Prvotno pri konstruiranju treba izvoditi zavarene spojeve sa što manjom ukrućenosti zavarenog sklopa, uz izbor oblika spoja sa što manje unesenog dodatnog materijala.

Vrlo je bitan pravilan izbor postupka zavarivanja, parametara i dodatnog materijala. Veliku ulogu u nastanku hladnih pukotina ima unos topline, kojega se mora kontrolirati. Premali unos topline povećava sklonost nastanku hladnih pukotina, dok prevelik unos topline uzrokuje pogrubljenje zrna, smanjenje istezljivosti i sklonost toplinskim pukotinama. Unos topline utječe na niz faktora kao što su geometrija i oblik zavora, mehanička svojstva i korozijska postojanost. Unos topline ovisi o jakosti struje (A), naponu (V) i brzini zavarivanja (cm/min), proračunava se prema normi HRN EN ISO 1011-1:2009.

Izbor odgovarajuće elektrode za zavarivanje uvelike utječe na osjetljivost na hladne pukotine. Kod zavarivanja čelika treba birati elektrode s bazičnom oblogom i malim sadržajem vodika, bazične punjenje žice. Pri podvodnom zavarivanju bitan je pravilan odabir vodonepropusne obloge elektrode i obloge elektrode. Preporučljivo je koristiti obloge koje mogu vezivati velike količine vodika iz atmosfere. [10]

### **2.3.2. Problem zakaljivanja**

Pri zavarivanju pod vodom dolazi do povećane brzine hlađenja zavora i ZUT-a i njihovog zakaljenja. Povišeni tlak i vodeno okruženje destabiliziraju luk te zahtjeva veće napone za održavanje luka. Metalurška analiza zavarenih spojeva čelika za izradu pomorskih instalacija ukazuju na prisutnost martenzitne mikrostrukture. Martenzitna mikrostruktura uzrokuje povećanje tvrdoće i smanjenje istezljivosti zavora.



Mehanička svojstva zavora mogu se naknadno popraviti toplinskom obradom područja zavora, ali ne primjenjuje se u praksi zbog svoje nepraktičnosti. Kontrola unosa topline uvelike utječe na zakaljivost i ostale probleme podvodnog zavarivanja. [9]

### 2.3.3. Smanjenje vidljivosti kod zavarivanja

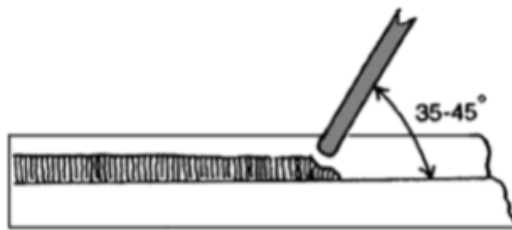
Pri podvodnom zavarivanju oslobađaju se mjehurići plina koji smanjuju vidljivost mjesta zavarivanja. Vidljivost pod vodom je promjenjiva. Zavarivač pri smanjenoj vidljivosti uvelike ovisi osjetilima dodira i zvuka. Kad se elektroda vodi pravilno i mirno zavarivač čuje pištajući zvuk. Pravilan način vođenja elektrode uključuje vođenje odgovarajućim kutom i brzinom zavarivanja. Takvim načinom vođenja izbjegavamo zaribavanje elektrode i gašenje električnog luka. Optimalan kut između elektrode i predmeta zavarivanja iznosi  $30 \pm 15^\circ$ , dok brzina zavarivanja iznosi 127 do 178 mm/min. [9]

Glavne dvije tehnike mokrog podvodnog zavarivanja su:

- povlačenje elektrode (zavarivanje korijena zavora)
- njihanje elektrode (popuna zavora i lice zavora).



Slika 18. Zavarivanje tehnikom njihanja elektrode [14]

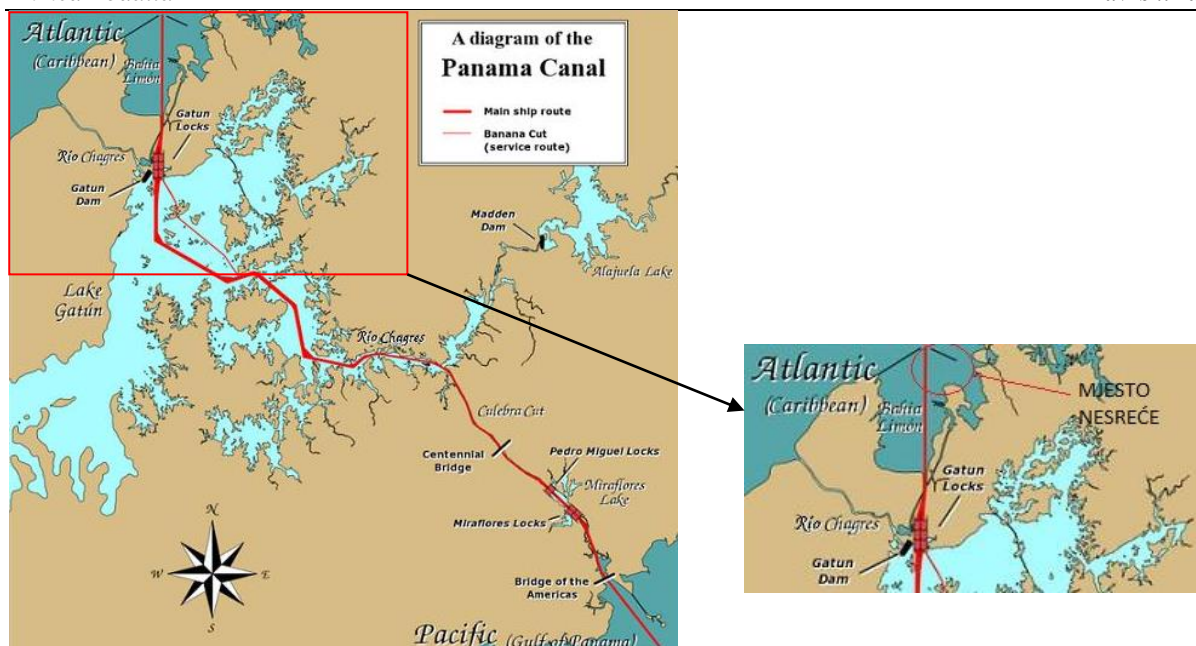


Slika 19. Zavarivanje tehnikom povlačenja [14]

Prije zavarivanja potrebna je dobra priprema spoja zavora. Mjesto zavarivanja mora biti očišćeno od nečistoća koje mogu biti organske (naslage podvodnih organizama) i anorganske (oksidi metala i hrđa). Čišćenje je potrebno poslije svakog prolaza kako bi ostvarili kvalitetan zavar.

### **3. PRIMJER SANACIJE PODVODNOG OBJEKTA- PODVODNI POPRAVAK TERETNJAKA**

Nesreća se dogodila 4. veljače. 2010. kad je teretnjak, koji je bio na putu iz New Orleansa prema Kini, udario u lukobran na atlantskoj strani Panamskog kanala (slika 20). Udar je bio silovit i uzrokovao je deformacije na trupu broda. Najviše je stradala oplata broda na pramcu broda, na kojoj je bilo 15 rupa u rasponu veličine od 10 cm do 7.3 metara. Oštećenja su bila velika te je postojala opasnost od potonuća teretnjaka. Potonuća teretnjaka na jako prometnom dijelu kanala značila bi smanjenje protoka brodova Panamskim kanalom. Dogovoreno je da se brod odvuče do najbližeg sidrišta unutar Panamskog kanala i tamo sanira. [15]



Slika 20. Panamski kanal [29]

Teretnjak, duljine 200 metara, širine 20 metara i maksimalne nosivosti 70,000 tona, oštećen u nesreći izgrađen je 1989 godine (slika 21.).



Slika 21. Teretnjak oštećen u nesreći [15]

Prve preglede broda izvršili su lokalni ronioci i zaključili da popravci moraju biti izvršeni s vanjske strane broda, nakon čega bi se voda ispumpala iz broda i popravci bi bili ponovljeni s unutarnje strane. [15]



Slika 22. Pukotina na pramcu broda [15]



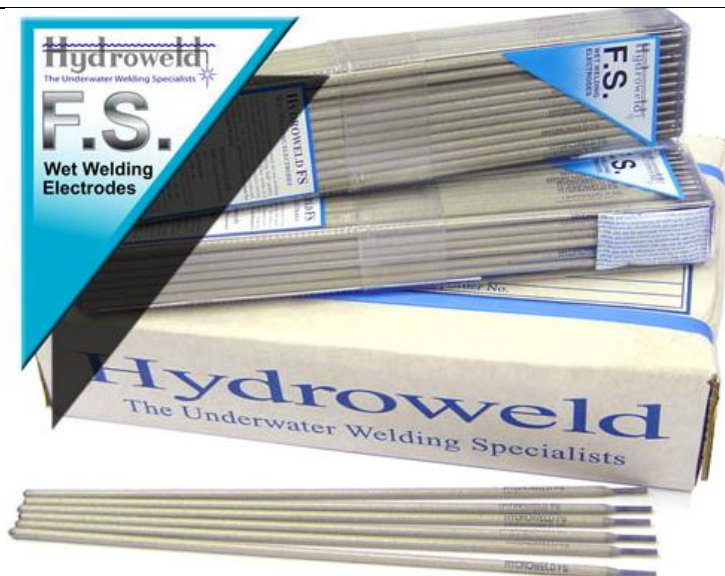
Slika 23. Ronilačka ekipa iz tvrtke Miami Diver Inc. [15]

Popravke je izvodila tvrtka Miami Diver Inc. čija je ponuda prihvaćena 11. veljače 2010. godine. Cilj pothvata je bio napraviti privremeno rješenje i omogućiti teretnjaku nastavak puta do Kine. Na rupe u trupu broda zavarene su ploče koje bi spriječile utjecanje vode u trup. Nakon isporuke brod je odveden do najbližeg brodogradilišta, gdje se napravila pravilna sanacija pramca broda. Procijenjeno vrijeme trajanja popravaka je 14 dana. [15]



Slika 24. Pukotina na pramcu broda [15]

Upotrijebljena tehnika zavarivanja je bila mokro podvodno zavarivanje. Korištene su elektrode *Hydroweld FS*. Specijalne elektrode za visokokvalitetna podvodna zavarivanja. Elektrode omogućavaju zavarivanje u slatkoj i slanoj vodi te zavarivanje u svim prisilnim položajima. Zavari napravljeni sa *Hydroweld FS* elektrodama, kvalitetom zadovoljavaju standarde AWS D3.6 i odobrene su za reparaturna zavarivanja. [16]



Slika 25. Hydroweld elektrode [16]

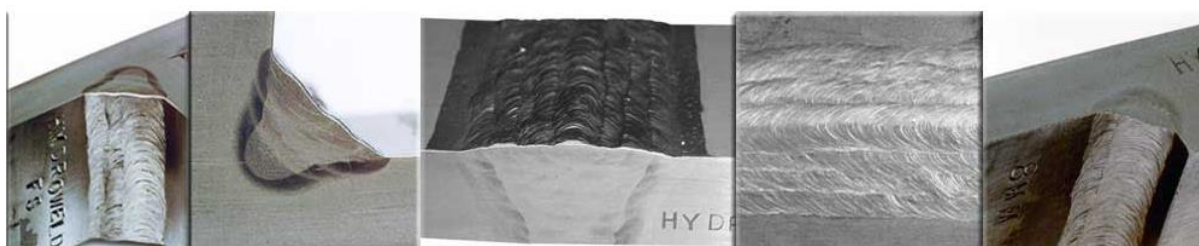
Svojstva zavara napravljenih *HYDROWELD FS* elektrodom su [16] :

- jednostavno uspostavljanje električnog luka
- korištenje u svim položajima
- stabilan električni luk
- velike količine depozitiranog materijala
- dobra penetracija korijena
- zavari su čvrsti i duktilni
- modificirana obloga specifično napravljena za uvjete rada u atmosferi s povećanim udjelom vodika.



Tablica 1. Testne vrijednosti zavara *HYDROWELD* elektrodom [16]

SVOJSTVA METALA ZAVARA		SASTAV TALINE U POSTOTKU (%)	
VLAČNA ČVRSTOĆA (Rm)	520 N/mm <sup>2</sup>	C	0.1
GRANIČA RAZVLAČENJA (Re)	460 N/mm <sup>2</sup>	Mn	0.5
		Si	0.43
TVRDOĆA	175Hv <sub>10</sub>	P	0.015
TESTIRANJE NA KRHKI LOM (SHARPIJEV BAT)		Mo	0.01
0° C	55J	S	0.008
-20° C	45J		
-30° C	32J		

Slika 26. Zavari napravljeni elektrodom *HYDROWELD FS* [16]

Radovi su izvršavali parovi ronilaca na dubini od 3 metra. Na zaštitnoj kacigi jednog od ronioca bila je kamera koja je uživo prenosila zahvat na monitore na površini. Zahvat je pomno pratio vođa projekta. Velika širina oštećenja značila je da su u vodu morali spustiti platformu duljine 16 metara po kojoj su zavarivači hodali. Zavarivači su popravke obavljali u smjenama.

Prioritet su imala oštećenja na desnoj strani pramca broda. Na oštećenja se prvotno zavarila potporna struktura, napravljena od profila koji su činili čvrstu mrežu na koju se moglo zavarivati ploče. Potom su na potpornu strukturu bile zavarene 10 mm debele ploče od A 36 visokokvalitetnog čelika. Čelik dobrih mehaničkih svojstava i zavarljivosti s malim udjelom ugljika. [15]

Tablica 2. Svojstva čelika A36 [17]

MEHANIČKA SVOSJTVA	IZNOS
VLAČNA ČVRSTOĆA	400 – 550 MPa
GRANICA RAZVLAČENJA	250 MPa
MODUL ELESTIČNOSTI	200 GPa

Ploče preklapaju pukotine za 100 mm sa svake strane te zavarene su u više prolaza s vanjske strane. Sa unutarnje strane na isti način zavare su ploče debljine 10 mm od istog materijala. Na popravke je potrošeno 2.700 kg materijala. Ispumpana je voda iz trupa broda i na zavare unutar zone zapljuskivanja valova nanešen je sloj impregnata na bazi epoxida. Podrobniji i detaljniji popravci izvršeni su u brodogradilištu. [15]





Slika 27. Stanje nakon izvršenih popravaka [15]



Slika 28. Izgled popravka [15]



Slika 29. Izgled popravka na većim rupama [15]



Slika 30. Pogled na popravke u brodogradilištu [15]



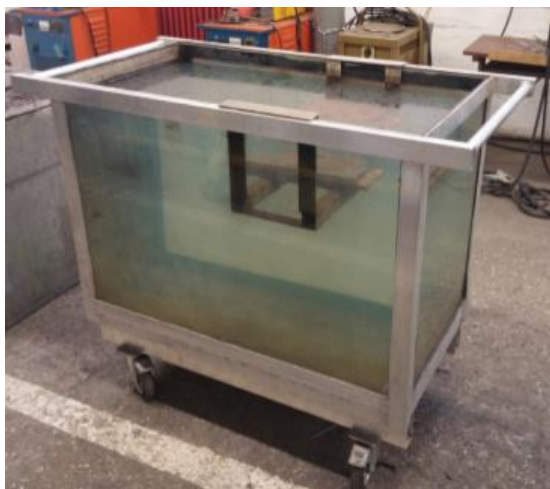
Slika 31. Popravci na pramcu broda [15]

Sanacija broda je bila izazovna zbog kratkog roka u kojem je morala biti završena, vremenskih uvjeta koji su otežavali popravke i veličine oštećenja broda. Problematična je bila i prometna lokacija na kojoj se radilo. [15]

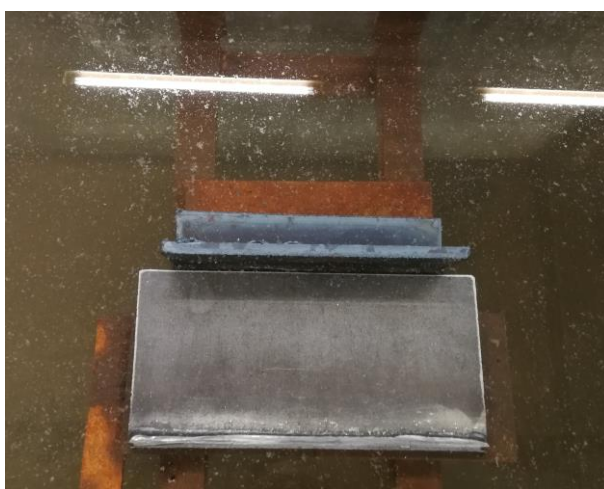
## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Eksperiment se sastoji od četiri faze: priprema pokusa, podvodno zavarivanje, izrada uzoraka i analiza dobivenih rezultata. Zadaća eksperimenta je bila ispitati primjenu austenitnih elektroda u mokrom podvodnom zavarivanju.

Mokro podvodno zavarivanje provedeno je u malom bazenu (slika 33). Bazen je dimenzija 1100 x 600 x 750 mm i volumena 500 litara. Bazen je napunjen slatkom vodom iz gradske opskrbe. Temperatura vode u bazenu iznosila je 23 – 25 °C.



Slika 32. Bazen za zavarivanje



Slika 33. Uzorak na postolju u bazenu

Pokus je bio zamišljen na način da se dvije ploče konstrukcijskog čelika (S355) kutno zavare, bez primreme ploča na dubini od 30 cm. Za zavarivanje korištene su tri različite austenitne elektrode od kojih dvije nemaju vodonepropusni sloj. Na te dvije elektrode ručno su nanešeni slojevi laka. Nakon što se lak osušio provedeno je zavarivanje. Treća elektroda je bila austenitna elektroda s tvornički nanešenim vodonepropusnim lakom.

#### 4.1. Materijal uzorka

Materijali za podvodno zavarivanje reguliraju se prema normi AWS D3.6M koja obuhvaća proces podvodnog zavarivanja i sve što je uključeno u njega (parametri, zavarljivost, tehnika, oprema).

Osnovni materijal je bio konstrukcijski čelik (S355).

Sastav čelika prikazan je u tablici 1.

Tablica 3. Kemijski sastav čelika S355 [18]

OSNOVNI MATERIJAL	C %	Mn %	P %	S %	Si %
S355	0,19	1,6	0,05	0,05	0,05

Ploče su bile dimenzija 300 x 110 x 10 mm. Uzorci su izrezani iz velike ploče pomoću plinske rezalice u Laboratorija za zavarivanje.

Čelik je odabran zbog izvrsne zavarljivost pri atmosferskom suhom zavarivanju.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{\%(Ni + Cu)}{15} \quad [2]$$

Ekvivalent ugljika (CE) je parametar pomoću kojeg određujemo zavarljivost materijala. Ovom metodom pretvaramo udio legirnih elemenata u udio ugljika. Ekvivalent ugljika za čelik S355 je 0,496. Uspoređujući rezultate s AWS D3.6M dobivamo da je čelik neprikladan za podvodno zavarivanje ( $C_{ekv} \geq 0,4$ ).



## 4.2. Uređaj za zavarivanje

Pri pokusu koristili smo *ULJANIK IRA 400* uređaj za zavarivanje sa sljedećim karakteristikama. Elektroda je u eksperimentu bila spojena na pozitivni pol izmjenične struje.



Slika 34. Uređaj za zavarivanje ULJANIK IRA 400



Slika 35. Karakteristike aparata za zavarivanje

### 4.3. Parametri zavarivanja

Medij u kojem se zavaruje utječe na parametre zavarivanja specifično pri podvodnom zavarivanju koristiti se veći napon za iste debljine elektroda u usporedbi sa zavarivanjem na zraku. Voda je medij kroz kojeg je teže uspostaviti i održavati električni luk. Prema [20], parametri za REL zavarivanje na zraku i pod vodom proračunavaju se prema formulama:

- Jakost struje;  $I_{\text{suho}} = d_{\text{el}} \times (30 \div 40)$ , A

$$I_{\text{mokr}} = I_{\text{suho}} \times (30 \div 40), \text{ A}$$

- Napon ;  $U = 20 + 0,04 \times I_{\text{mokr}}$ , V

- Unos topline;  $Q = \frac{U \times I_{\text{mokr}} \times \eta_{\text{REL}} \times 60}{v_{\text{zav}} \times 1000}$ , kJ/cm

Kao što je vidljivo iz jednadžbi, parametar jakosti struje viši je za 30 - 40 ampera pri mokrom zavarivanju. Veća jakost struje implicira veći napon i veći unos topline.

Tablica 4. Parametri zavarivanja korišteni u eksperimentu

ELEKTRODA	JAKOST STRUJE, A	NAPON, V	BRZINA ZAVARIVANJA, cm/min	UNOS TOPLINE, kJ/cm
Elektroda Jesenice R19/9 (3.25 mm)	180	27,2	18	13,1
Elektroda Jesenice R29/9 (4 mm)	250	30	20	18
Elektroda Zagreb EZ-KROM 30 R	180	27,2	18	13,1

#### 4.4. Elektrode za mokro pdovodno zavarivanje

Zadatak eksperimenta je provjeriti primjenu austenitnih elektroda u mokrom podvodnom zavarivanju. Elektrode korištene u eksperimentu su sastava:

Tablica 5. Sastav eksperimentalnih elektroda

ELEKTRODA	C, %	Cr, %	Mn, %	Ni, %
Elektroda Jesenice R19/9 (3.25 mm)	0,03	19	-	10
Elektroda Jesenice R29/9 (4 mm)	0,03	29	1,2	9

Tablica 6. Sastav elektrode sa tvornički nanešenim vodonepropusnim lakom

KONTROLNA ELEKTRODA	C, %	Cr, %	Mn, %	Ni, %	Si, %	Mo, %
Elektroda Zagreb EZ- KROM 30 R	0,03	18,5	0,9	12	0,8	2,7



Slika 36. Elektroda R 19/9 prije bojanja



Slika 37. Elektroda R 29/9 prije bojanja



Slika 38. Elektroda EZ-KROM 30 R

Legirni elementi u elektrodi imaju sljedeće zadaće [22]:

- **UGLJIK** - povećava vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja, te smanjuje udarnu rad loma i deformabilnost. Postotak preko 0,25% pogoršava zavarljivost.
- **KROM** - ovisno o postotku legirnog elementa talina i spoj mogu poprimiti sljedeća svojstva: povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću, povećana korozijska otpornost, smanjenje udarni rad loma, otpornost oksidaciji na povišenim temperaturama.



- MANGAN – povećava se vlačna čvrstoća, tvrdoća i granica razvlačenja
- NIKAL – povećanje granice razvlačenja, istezljivosti i otpornost na krhki lom pri niskim temperaturama
- SILICIJ – povećava granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. U postotcima preko 1,2% smanjuje zavarljivost
- MOLIBDEN – povećanje udarni rad loma, smanjenje krhkosti pri niskim temperaturama i poboljšava korozijsku otpornost.

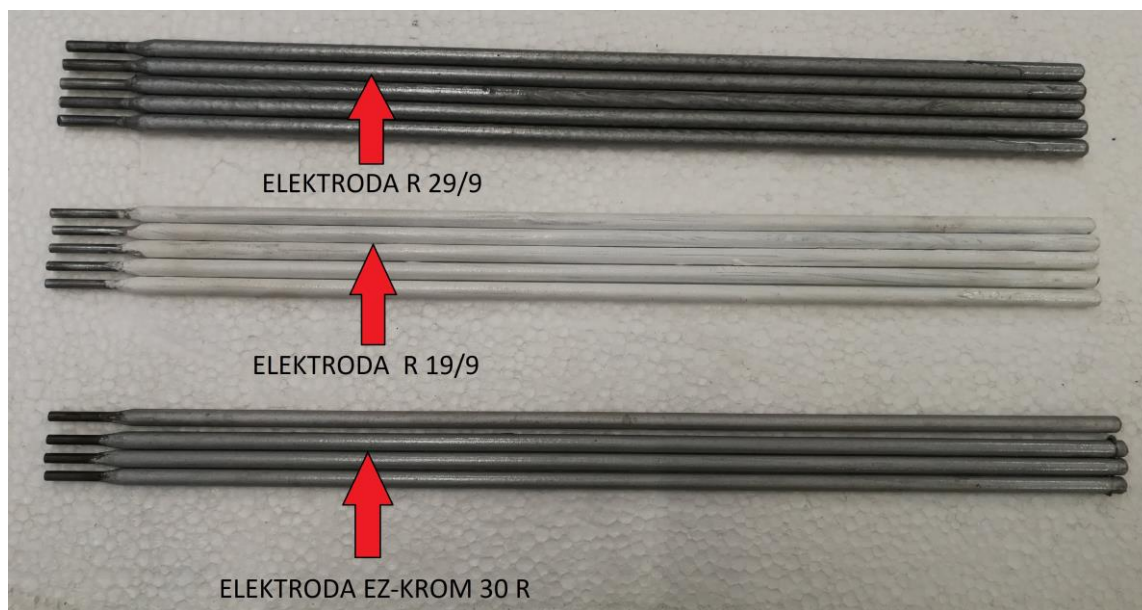
Nanešen je vodonepropusni lak. Lak ima funkciju zaštite obloge elektrode od vlažne okoline. Na elektrodu R19/9 nanašen je *DURALUX PU*, zaštitno-dekorativni lak na bazi poliuretana. Na elektrodu R29/9 nanešen je *COMBI COLOR HAMMERTONE* temeljni i završni lak koji sadrži inhibitore korozije.[21] Nakon bojanja i sušenja elektrode su spremne za eksperiment.



Slika 39. Duralux pu - lak za drvo i metal [30]



Slika 40. Combicolor rust oleum - lak za metal [31]



Slika 41. Elektrode nakon bojanja

#### 4.5. Rezultati i njihova analiza

Nakon uspješne pripreme materijala i elektroda provedeno je zavarivanje ploča zadanim parametrima (slika 44).

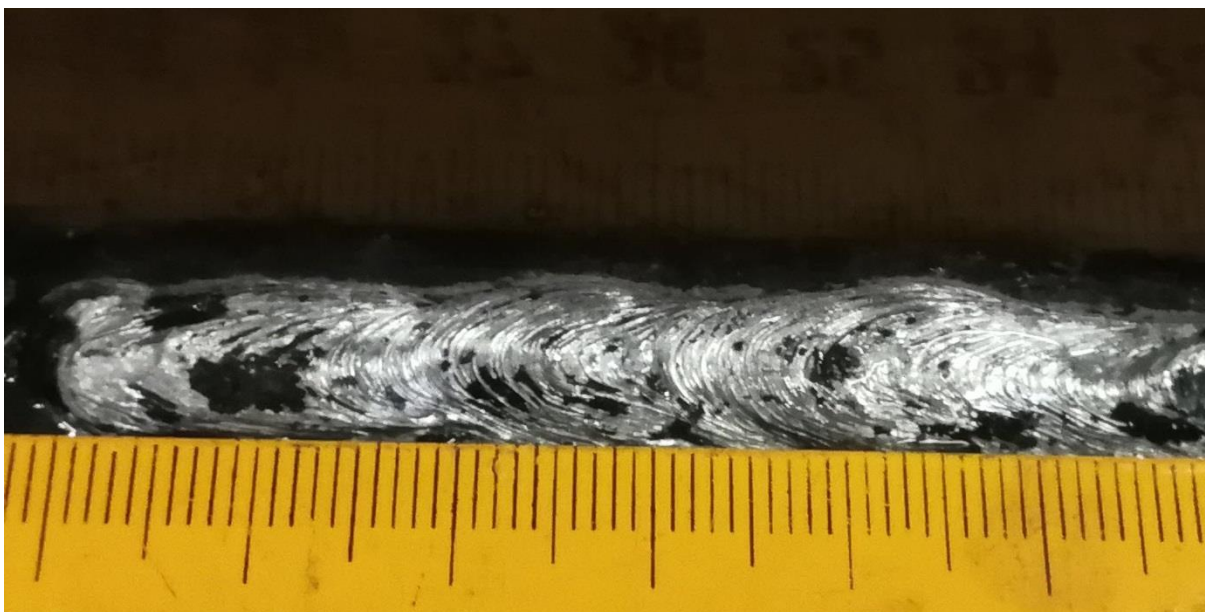


Slika 42. Zavarivanje pod vodom

Nakon zavarivanja dobili smo sljedeće zavare na kojima smo proveli nerazorna i razorna ispitivanja. Primjećeno je da je geometrija, nadvišenje zavora i njegov vanjski izgled uvelike narušen kod elektroda koje smo bojali, dok kod elektrode s tvornički nanešenim zaštitnim slojem vidljiva je veća kvaliteta izgleda zavora.



Slika 43. Zavar izveden s elektrodom R29/9



Slika 44. Zavar izveden elektrodom R19/9



Slika 45. Sastav elektrode sa tvornički nanešenim vodonepropusnim lakom

Nakon zavarivanja primjećeno je da se vodonepropusni sloj laka koji je naknadno nanešen otopio i/ili počeo ljuštiti, dok je vodonepropusni sloj na elektrodi EZ KROM 30 R ostao homogen. Najvjerojatniji razlog tome je neprilagođenost premaza ulozi za koju se koristili (slike 48,49,50).



Slika 46. Vanjski sloj elektrode R 29/9 nakon zavarivanja (ljuštenje i izgoreni dijelovi)



Slika 47. Vanjski sloj elektrode R 19/9 nakon zavarivanja (ljuštenje i izgoreni dijelovi)

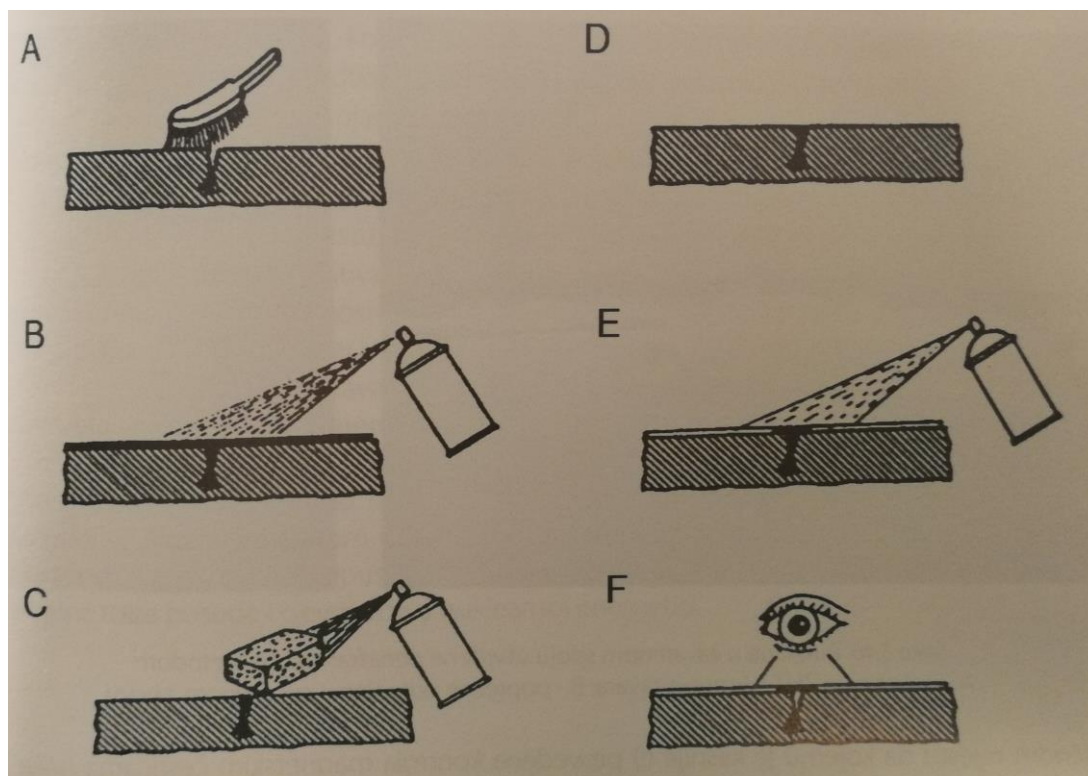




Slika 48. Elektroda EZ KROM 30 R

#### 4.5.1. Nerazorna ispitivanja – Penetranti

Metoda ispitivanja zasnovana na svojstvu tekućina da prodiru u nepravilnosti na površini i ispunjavaju ih. Tekućine koje koristimo u ovoj metodi spadaju u skupinu lakih ulja. Način primjene metode prikazan je na slici 54. [10]



Slika 49. Postupak primjene penetrantne metode ispitivanja [10]

Koraci primjene penetrantske metode su [10]:

- A. čišćenje i odmašćivanje površine
- B. nanošenje penetranta
- C. uklanjanje viška penetranta sa površine
- D. zaostali penetrant u pukotini
- E. naštavanje razvijača
- F. pregled površine.

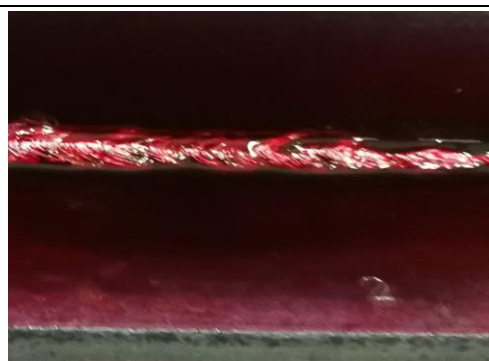


Slika 50. Penetrant (lijevo) i razvijač (desno) korišteni u eksperimentu

Bitno je reći da se nakon nanošenja penetranta čeka 10 - 20 min da penetrant prodre u sve nepravilnosti nakon čega se višak ispira i nanosi razvijač, čija je uloga prikazati mjesta na kojima je ostao penetrant. Prisutnost penetranta ukazuje na postojanje pogrešaka na zavarenom spoju. Razvijač je bijele boje te se zaostali penetrant koji je crven lako vidi na bijeloj pozadini.



Slika 51. Penetrant na zavaru 1



Slika 52. Penetrant na zavaru 2



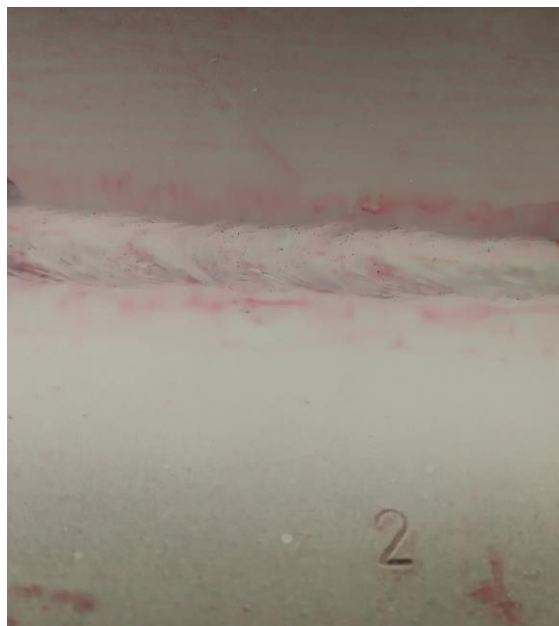
Slika 53. Penetrant na kontrolnom zavaru

Nakon nanošenja penetranta i ispiranja istog nanešen je razvijач te ostavljen 10 min i dobiveni su sljedeći rezultati. Na zavaru 1 napravljen elektrodom R 29/9 primjetne su površinske greške. Zavar je na većem dijelu svoje površine ostao bijel što je znak da razvijач nije reagirao s penetrantom (slika 56).



Slika 54. Rezultati penetracijske analize na zavaru 1

Zavar broj 2 na svojoj površini nema crvene tragove što znači da nema rupa i/ili pukotina u koje je penetrant mogao ući (slika 57).



Slika 55. Rezultati penetracijske analize na zavaru 2

Zavar izveden elektrodom EZ KROM 30 R na površini ima veliku pukotinu. Pukotina je nastala 15 minuta nakon zavarivanja te pretpostavljeni uzrok pucanja je molekularni vodik u kristalnoj strukturi zavora. Mogući razlozi većeg udjela vodika u zavaru su uvjeti u kojima je zavar nastao (vodena atmosfera).

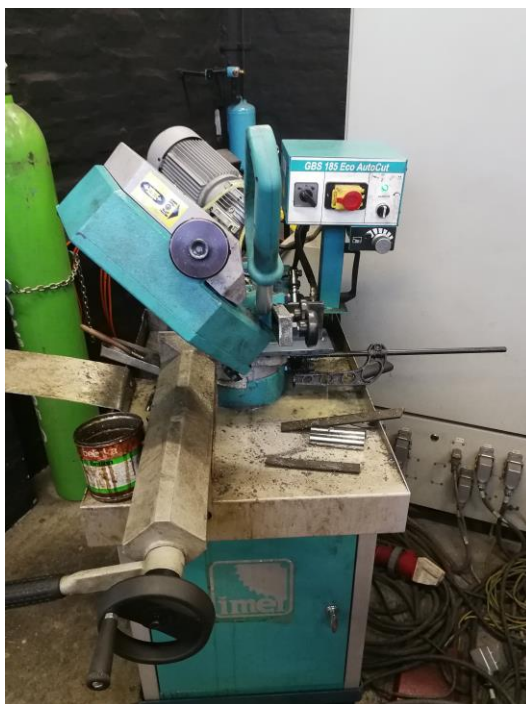


Slika 56. Pukotina na zavaru izvedenom elektrodom EZ KROM 30R



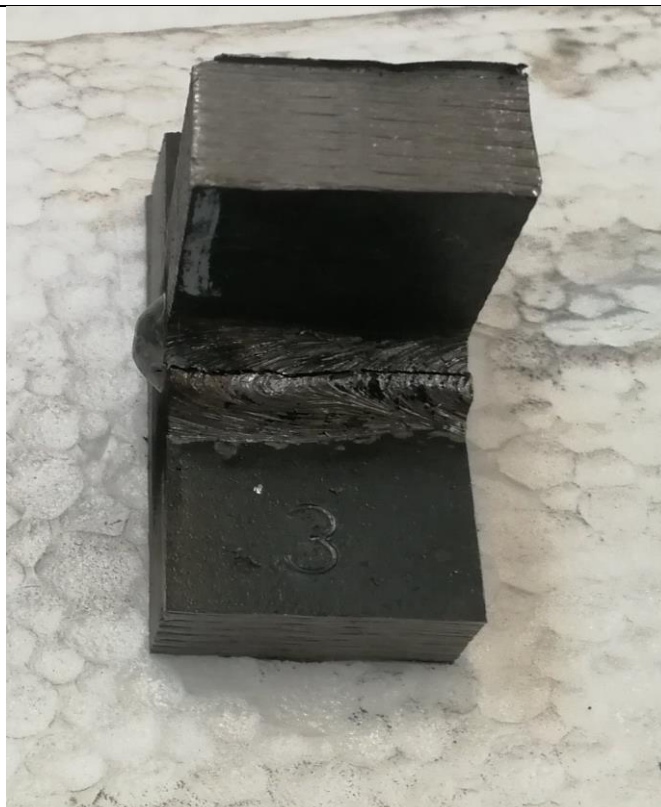
#### 4.5.2. Razorna metoda ispitivanja – metalografsko ispitivanje

Metalografska ispitivanja su standardna ispitivanja za detaljniju analizu zavarivačkih čimbenika. Laboratorijsko ispitivanje ima zadaću dokazivanja određenih svojstava zavarenog spoja. Za analizu spoja uzorci se izrezuju iz punog presjeka. Nakon rezanja uzorci se bruse, poliraju i nagrizzaju otopinama. Sastav otopine za nagrizzanje ovisi o vrsti osnovnog materijala i materijala zavora. Uzorke smo rezali na tračnoj pili. Iz svakog zavora izdvojili smo po jedan uzorak.



Slika 57. Tračna pila

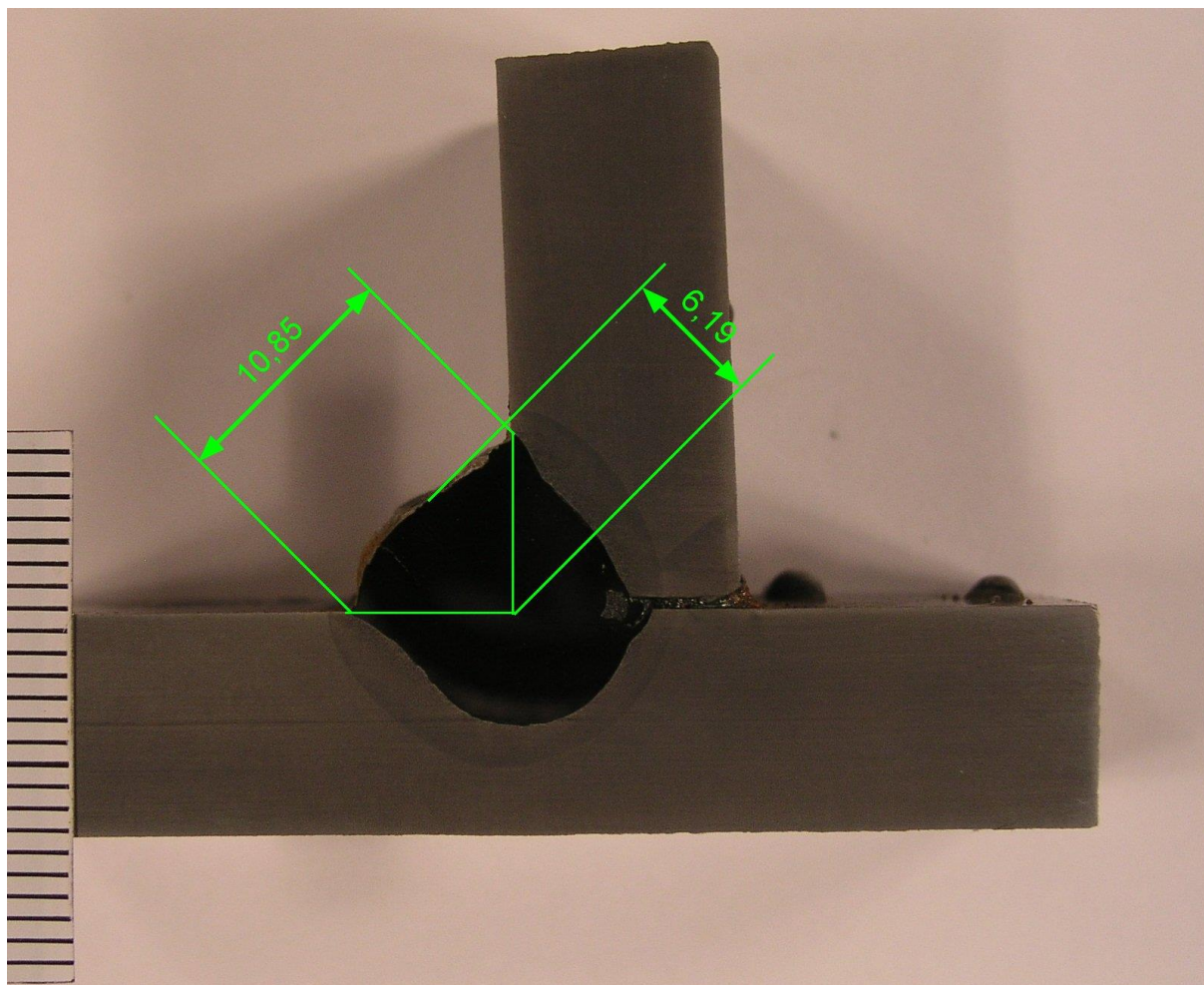
Uzorci se nakon rezanja bruse i poliraju. Brušeni su sa 8 brusnih papira, različite granulacije. Granulacije korištene za brušenje su P80, P100, P150, P240, P320, P400, P850, P1500, P2400, nakon čega su uzorci poslani na poliranje. Cilj brušenja i poliranja je dobiti što glađu i sjajniju površinu kako bi rezultati nakon nagrizzanja bili što jasniji.



Slika 58. Uzorak prije brušenja

Nagrizanje je provedeno nital-om, otopinom dušične kiseline i alkohola. Često se koristi za nagrivanje ugljičnih čelika. Brušene površine umočene su u nital te nakon 5 min izvađene i isprane. Rezultati nagrivanja odmah su vidljivi. Jasno je vidljiva granica između osnovnog metala i metala zavara. Osim raličitih mikrostruktura vidljiva je i ZUT.

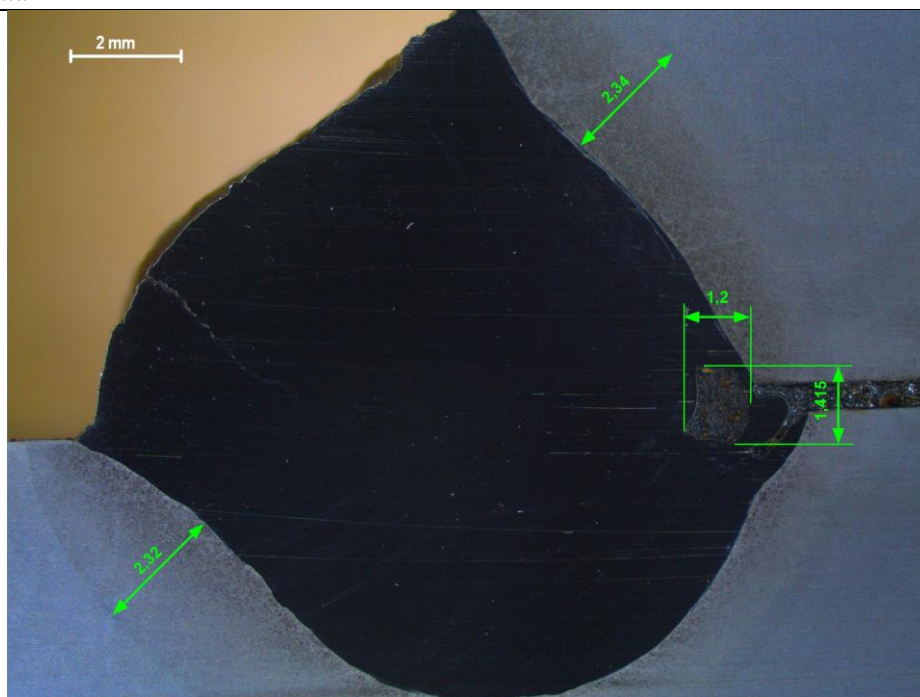
- ZAVAR 1 – Elektroda R29/9



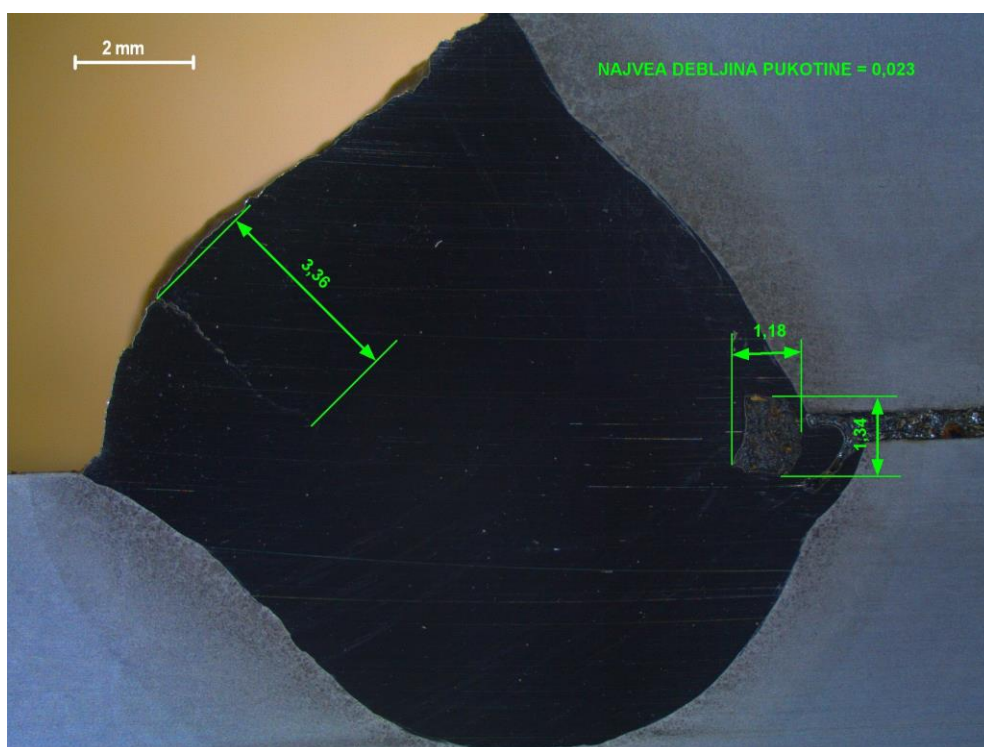
Slika 59. Geometrija zavora na presjeku

Zavar 1 izrađen je elektrodom R29/9 promjera 4 mm. Iz slike vidljiva je velika dubina penetracije zavora i vidljivo je da elektroda nije držana pod kutem od  $45^\circ$  što je uzrokovalo veću penetraciju u horizontalnu ploču nego u vertikalnu ploču. Prema slici 61 jasno je vidljiva ZUT, koja je ravnomjerno udaljena od spojnice osnovnog materijala i metala zavora. Osim greške u geometriji zavora, vidljivo je da je došlo do nepotpunog provarivanja korijena zavora i nastanka pukotine na čelu zavora. Pukotina je nastala nakon zavarivanja te pretpostavka je da spada u skupinu hladnih pukotina (slika 63).





Slika 60. Makro izbrusak zavara 1 – Promjer ZUT-a i dimenzije nepotpunog provara korijena

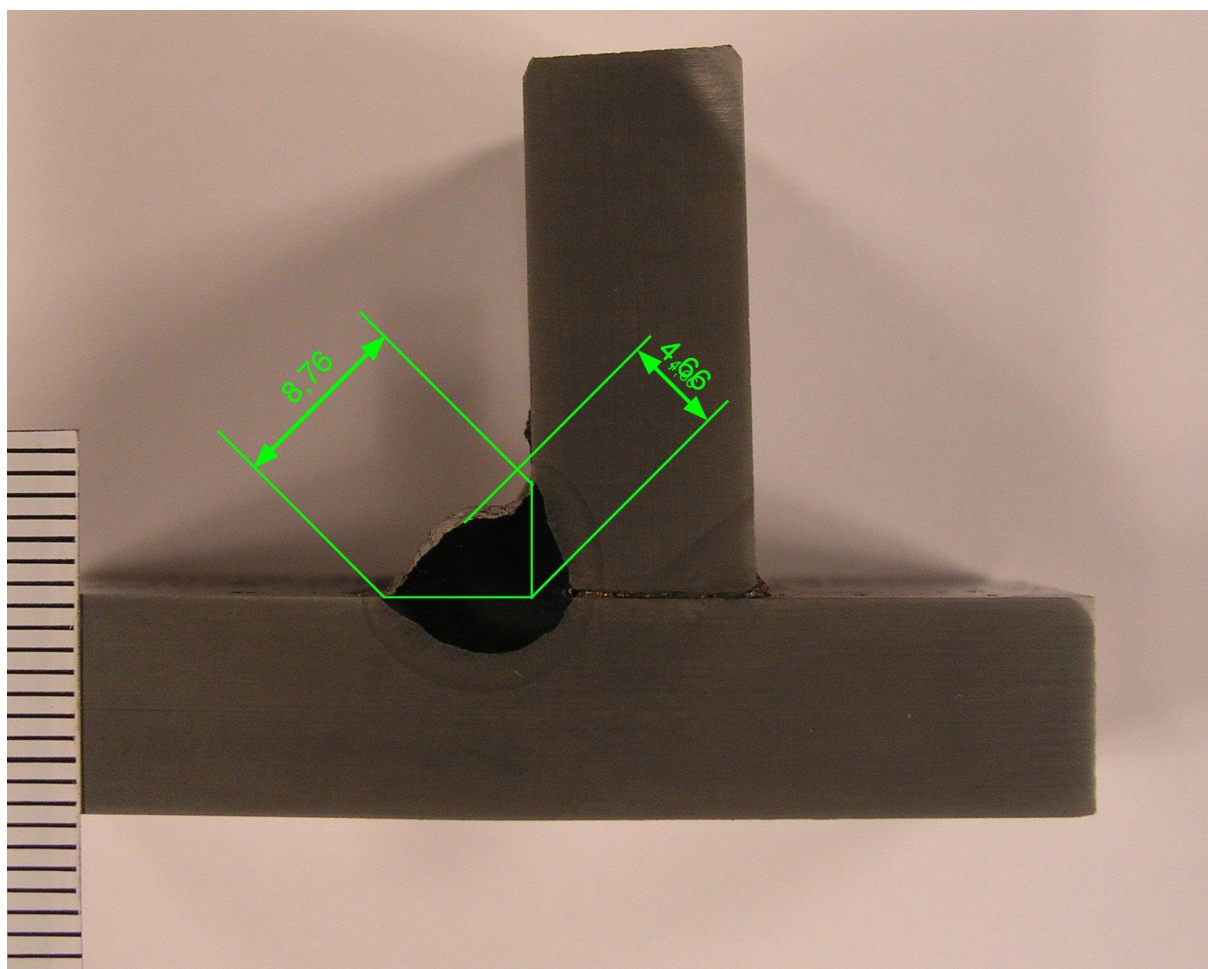


Slika 61. Makro izbrusak prikazuje greške u zavaru 1

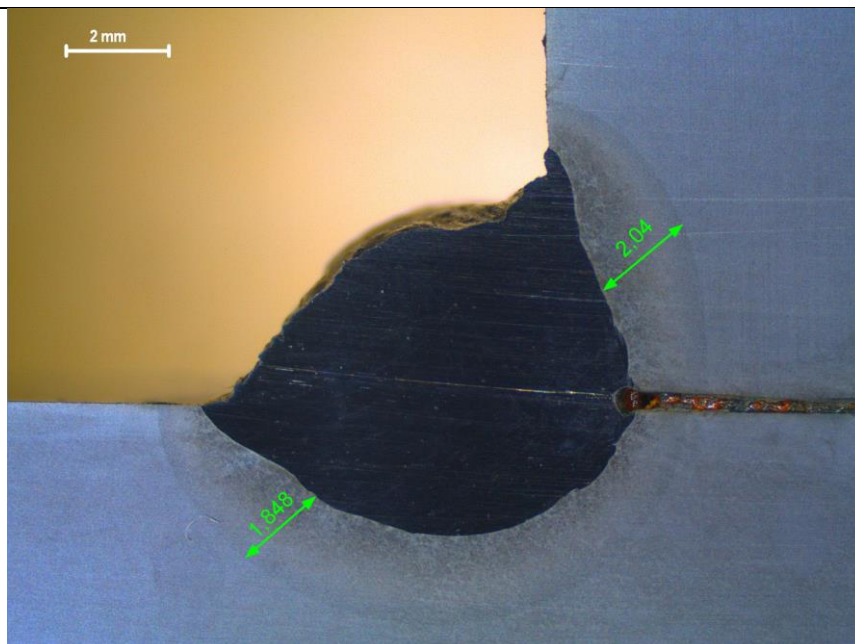
- ZAVAR 2 – Elektroda R19/9

Uspoređujući zavar 1 i 2 vidljivo je da je penetracija na zavaru 2 manja i da je ZUT manji. Uzrok tomu je manji promjer elektrode korišten u zavaru 2. Elektroda za zavar 2 je promjera 3.25 mm. Manji promjer elektrode zahtjeva manju jačinu struje što ima za posljedicu manji unos topline u usporedbi sa elektrodom zavara 1 (slika 65).

Makro izbrusak zavara 2 ne pokazuje neke veće nepravilnosti u zavaru. Ploče nisu jednoliko protaljene, veća penetracija je na horizontalnoj ploči. Uzrok geometrijske nepravilnosti je kut zavarivanja koji nije bio pravilan. Zavarivač je zbog manjka prostora i prisilne pozicije smanjio kut zavarivanja.



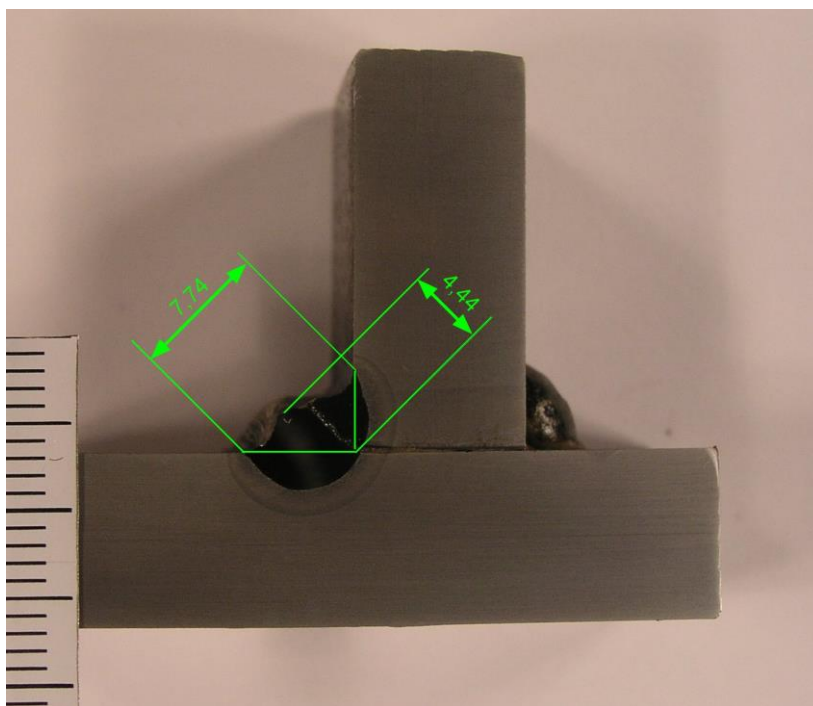
Slika 62. Geometrija zavara 2



Slika 63. ZUT i geometrija zavora 2

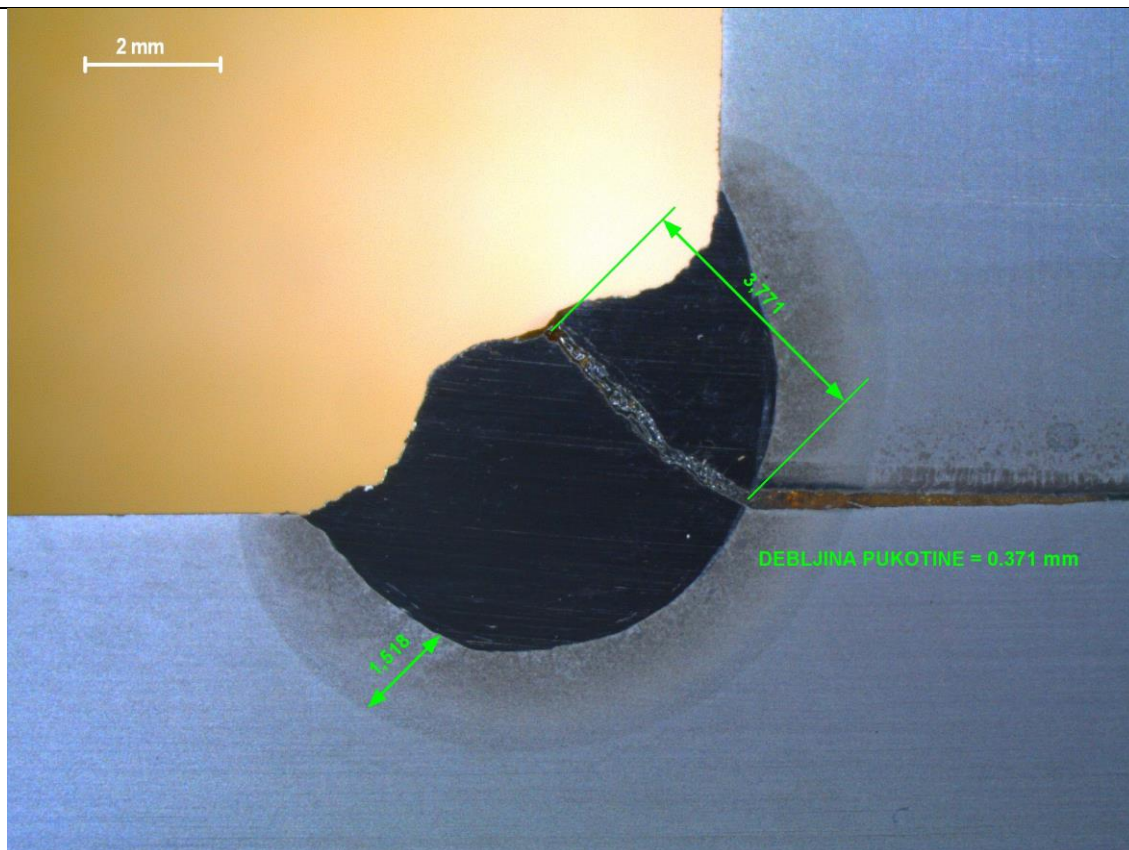
- ZAVAR 3 – Elektroda EZ-KROM 30R

Nakon zavarivanja elektrodom EZ KROM 30R i hlađenja došlo je do pucanja zavora po cijelom presjeku.



Slika 64. Geometrija zavora 3





Slika 65. ZUT i duljina pukotine

Najvjerojatniji uzrok pucanja je povećan udio delta ferita u metalu zavora ( $\delta$ -Fe), austenitni čelici su osjetljivi na povećan postotak delta ferita. Geometrija zavora kao u prethodna dva zavora nije najbolja. Razlog tomu je isti kao kod ostalih zavora, teška pozicija zavoraivača. ZUT je ravnomjerno raspoređena oko linije spoja osnovnog materijala i materijala zavora.

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bila je analiza primjene austenitnih elektroda pri mokrom podvodnom zavarivanju uz primjenu REL postupka zavarivanja. Tijekom zavarivanja nije bilo većih poteškoća prilikom uspostavljanja električnog luka i održavanje istog. Zaključeno je da prilikom ovog tipa zavarivanja uspješnost i kvaliteta zavara uvelike ovise o vještini zavarivača. Svi uzorci su prošli vizualnu analizu prema normi AWS D.6M. i mikrostrukturalnu analizu.

Rezultati eksperimenta pokazuju da je zavar 2 izrađen elektrodom R19/9 postigao najbolje rezultate. Pretpostavlja se da je uzrok boljih rezultata u razornim i nerazornim ispitivanjima manji promjer elektrode i manji unos topline. Elektroda R 29/9 je imala najveću penetraciju ali zbog većeg promjera i većeg unosa topline bilo je teže kontrolirati talinu. Velik unos topline povećava mogućnost nastanka grešaka u zavaru 1. Najlošiji rezultati postignuti su s elektrodom EZ KROM 30 R. U zavaru izrađenom s tom elektrodom došlo je do pucanja i potpunog odvajanja ploča.

Osim vodonepropusnog premaza, za podvodno zavarivanje preporučeno je korištenje austenitnih elektroda kako bi se smanjila mogućnost nastanka hladnih pukotina. Prilikom korištenja austenitnih elektroda postoji opasnost od pucanja uzrokovanog povećanim udjelom delta ferita stoga treba poduzeti sve mjere da se izbjegne takva mikrostruktura metala zavara. Podvodno zavarivanje najbolje je primjenjivati u reparaturne svrhe. Fleksibilnost i specifičnost primjene postupka mokrog podvodnog zavarivanja u nekoj mjeri opravdava njegovu veću cijenu u usporedbi s atmosferskim zavarivanjem.

Iz analize zavarenih spojeva zaključeno je da u situacijama kada pristup elektrodama s tvornički nanesenim vodonepropusnim slojem nije moguće prihvatljivo je koristiti ručno pripremljene elektrode. Korišteni lak može biti za drvo ili metal, najvažnije da je vodonepropusan.

Udjel morskih konstrukcija raste, a njim i potreba za izgradnjom i održavanjem istih. Investicije u tehnologije i procese koji specifično podupiru takvu industriju raste. Pretpostavljen je ubrzani razvoj tehnologija za održavanje morskih konstrukcija, a među njima i tehnologije zavarivanja. Potrebna su još velika ulaganja da bi mokro podvodno zavarivanje bilo jednako kvalitetno kao zavarivanje na zraku.





## LITERATURA

- [1] <https://waterwelders.com/underwater-welding-history/>; 10.2.2018.
- [2] I. Garašić; Doktorski rad - Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, FSB Zagreb, 2008.
- [3] B. Cerovečki, Završni rad – Mokro podvodno zavarivanje martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4, FSB Zagreb, 2017
- [4] R.T.Brown, K.Masubuchi; Fundamental Research on Underwater Welding-Effects of water environment on metallurgical structures of welds; 1975.
- [5] I. Garašić, Z. Kožuh, Slobodan Kralj; Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata, FSB Zagreb.
- [6] <https://waterwelders.com/underwater-wet-welding-equipment/#machine>; 11.2.2018.
- [7] D. J. Keates; Professional divers manual on wet-welding, Cambridge,
- [8] <http://weldguru.com/welding-electrode/> 13.2.2018.
- [9] I. Garašić :Seminar- podvodno zavarivanje;
- [10] I.Juraga, K.Ljubić, M.Živčić, I.Garašić; Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja
- [11] H. OZAKI, J. NAIMAN AND K. MASUBUCHI; A Study of Hydrogen Crackin Underwater Steel Welds, Kolovoz 1977.
- [12] T.Matković, P.Matković; Fizikalna metalurgija 1. Zagreb 2011.
- [13] [www.glossary.periodni.com](http://www.glossary.periodni.com) 13.2.2018.
- [14] I. Garašić; Postupci zavarivanja-Mokro podvodno zavarivanje, prezentacija
- [15] Underwater magazine, November/December 2011. 16.-26. Str
- [16] [www.hydroweld.com/2016-FSElectrodes.html](http://www.hydroweld.com/2016-FSElectrodes.html);14.2.2017 .
- [17] [www.metalsupermarkets.com/grade-guide-a36-steel/](http://www.metalsupermarkets.com/grade-guide-a36-steel/); 15.2.2018.
- [18] [www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022](http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022); 15.2.2018
- [19] Underwater Welding Code; 5th edition; American Welding Society (AWS) D3 Committee on Welding in Marine Construction; 2010
- [20] I.Garašić; Predavanja iz Postupaka zavarivanja i Zavarljivosti 2016
- [21] [sitolor.com/duralux-aqua-pu/](http://sitolor.com/duralux-aqua-pu/) 18.2.2018.
- [22] <http://e-metallicus.com>18.2.2018

- [23] [www.cnbc.com/2018/01/24/us-oil-prices-top-65-a-barrel-for-the-first-time-since-dec-2014](http://www.cnbc.com/2018/01/24/us-oil-prices-top-65-a-barrel-for-the-first-time-since-dec-2014)
- [24] <http://arcraftplasma.blogspot.hr/18.9.2016>.
- [25] [www.millerwelds.com](http://www.millerwelds.com) 20.2.2018.
- [26] [www.welderreferer.com](http://www.welderreferer.com) 20.2.2018.
- [27] [dir.indiamart.com/delhi/copper-welding-cable.html](http://dir.indiamart.com/delhi/copper-welding-cable.html) 20.2.2018.
- [28] <http://weldingsource.org> 20.2.2018.
- [29] <http://www.paluba.info> 20.2.2018.
- [30] [sitolor.com/duralux-aqua-pu/](http://sitolor.com/duralux-aqua-pu/) 20.2.2018.
- [31] [www.rust-oleum.eu/CombiColor](http://www.rust-oleum.eu/CombiColor) 20.2.2018.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**